



Étude énergétique et modélisation d'un Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage d'Air Comprimé (SHEDAC)

Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en Ingénierie
en vue de l'obtention du grade de maître en génie

PAR
© NICOLAS MARTINEZ

Août 2015

Composition du jury :

Rafic YOUNES, président du jury, UQAR, Université Libanaise

Adrian ILINCA, directeur de recherche, UQAR

Hussein IBRAHIM, codirecteur de recherche, UQAR, Technocentre Éolien

Karim BELMOKHTAR, examinateur externe, Technocentre Éolien

Dépôt initial le 27 avril 2015

Dépôt final le 3 août 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Le travail de ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) ainsi qu'avec l'étroite collaboration du Techno Centre Éolien de Gaspé (TCE). Je tiens également à mentionner l'implication de l'École de Technologie Supérieure de Montréal (ETS) et de l'Institut Technologique de Maintenance Industrielle de Sept-Îles (ITMI) qui ont été des acteurs majeurs dans le projet global dont mon travail fait partie.

Ce travail n'aurait pas pu être effectué sans le soutien de nombreuses personnes envers qui je souhaiterais témoigner ma vive reconnaissance.

Tout d'abord, je souhaite adresser un très grand remerciement à mon directeur Adrian ILINCA, professeur à l'UQAR et directeur du LREE, pour m'avoir accueilli chaleureusement dans son laboratoire afin de réaliser ma maîtrise, pour sa grande confiance en moi durant la période de mes travaux et pour sa disponibilité malgré ses nombreuses occupations.

Je tiens également à remercier mon codirecteur Hussein IBRAHIM, directeur de recherche au TCE, pour son encadrement et son aide très précieuse dans la compréhension de mes problématiques et dans les réussites de mes travaux.

Je souhaite aussi adresser un vif remerciement à tous les autres étudiants de l'UQAR impliqués dans ce projet de recherche, notamment Youssef Ben Chaabane dont l'aide apportée sur l'étude énergétique du camp Esker a été fortement judicieuse et appréciée.

Enfin, que toutes les personnes qui ont directement ou indirectement participé à l'élaboration de mon projet, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

RÉSUMÉ

Actuellement le Canada et plus spécialement le Québec, comptent une multitude de sites isolés dont l'électrification est assurée essentiellement par des génératrices diesel à cause, principalement, de l'éloignement du réseau central de distribution électrique. Bien que considérée comme une source fiable et continue, l'utilisation des génératrices diesel devient de plus en plus problématique d'un point de vue énergétique, économique et environnemental.

Dans le but d'y résoudre et de proposer une méthode d'approvisionnement plus performante, moins onéreuse et plus respectueuse de l'environnement, l'usage des énergies renouvelables est devenu indispensable. Différents travaux ont alors démontré que le couplage de ces énergies avec des génératrices diesel, formant des systèmes hybrides, semble être une des meilleures solutions. Parmi elles, le système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC) se présente comme une configuration optimale pour l'électrification des sites isolés. En effet, différentes études ont permis de mettre en avant l'efficacité du stockage par air comprimé, par rapport à d'autres technologies de stockage, en complément d'un système hybride éolien-diesel.

Plus précisément, ce système se compose de sous-systèmes qui sont: des éoliennes, des génératrices diesel et une chaîne de compression et de stockage d'air comprimé qui est ensuite utilisée pour suralimenter les génératrices. Ce processus permet ainsi de réduire la consommation en carburant tout en agrandissant la part d'énergie renouvelable dans la production électrique. À ce jour, divers travaux de recherche ont permis de démontrer l'efficacité d'un tel système et de présenter une variété de configurations possibles.

À travers ce mémoire, un logiciel de dimensionnement énergétique y est élaboré dans le but d'uniformiser l'approche énergétique de cette technologie. Cet outil se veut être une

innovation dans le domaine puisqu'il est actuellement impossible de dimensionner un SHEDAC avec les outils existants. Un état de l'art spécifique associé à une validation des résultats a été réalisé dans le but de proposer un logiciel fiable et performant. Dans une logique visant l'implantation d'un SHEDAC sur un site isolé du Nord-du-Québec, le logiciel développé a été, ensuite, utilisé pour réaliser une étude énergétique permettant d'en dégager la solution optimale à mettre en place. Enfin, à l'aide des outils et des résultats obtenus précédemment, l'élaboration de nouvelles stratégies d'opération est présentée dans le but de démontrer comment le système pourrait être optimisé afin de répondre à différentes contraintes techniques.

Le contenu de ce mémoire est présenté sous forme de trois articles originaux, soumis à des journaux scientifiques avec comité de lecture, et d'un chapitre spécifique présentant les nouvelles stratégies d'opération. Ils relatent des travaux décrits dans le paragraphe précédent et permettent d'en déduire un usage concluant et pertinent du SHEDAC dans un site isolé nordique.

Mots clés : système hybride, éolien-diesel, air comprimé, stockage, site isolé, logiciel énergétique, dimensionnement, stratégie d'opération.

ABSTRACT

Currently, Canada and especially Quebec, consist of a multitude of remote areas where the electrification is essentially insured by the use of diesel generators because of the remoteness from the main electricity grid. Although regarded as a reliable and continuous source, the use of generators is becoming more and more problematic from an energy, economic and environmental point of view.

In order to solve these problems and propose a more efficient supply method, cheaper and more environmentally friendly, the use of renewable energy has become indispensable. Various studies have shown that the coupling of these energies with diesel generators, forming hybrid systems, seems to be one of the best solutions. Among them, the wind-diesel hybrid system with compressed air storage (WDCAS) is as an optimal configuration in remote areas. Indeed, various studies have put forward the compressed air storage efficiency, compared to other storage technologies, in addition to a wind-diesel hybrid system.

More exactly, the system consists of sub-systems which are: wind turbines, generator, and a compressed air storage process which is subsequently used to supercharge the generators. This process makes it possible to reduce fuel consumption while expanding the ratio of renewable energy in electricity production. To date, various researches has demonstrated the effectiveness of this system and presented variety of possible configurations.

Through this master thesis, a WDCAS sizing software is developed to standardize the energy approach of this technology. This tool is meant to be an innovation in the field because it's currently impossible to sizing this system with existing tools. A state of the art associated with a specific validation of the results was carried out in order to provide a

reliable and powerful software. In logic to implement a WDCAS in a northern Quebec remote area, the developed software was used to carry out an energy study to bring out the solution to implement. Finally, using the previous tools and results, the development of new operating strategies is presented in order to demonstrate how the system could be optimised depending on various technical constraints.

The content of this paper is presented in the form of three original articles, submitted to scientific journals with peer, and a chapter presenting the new operating strategies. They talk about the work described in the previous paragraph and allow to infer conclusive and relevant use of WDCAS in a northern remote area.

Keywords: hybrid wind-diesel system, compressed air storage, remote area, energy software, sizing, operating strategies.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xix
LISTE DES SYMBOLES.....	xxi
CHAPITRE 1 Introduction	1
1.1 GENERALITES SUR LA PRODUCTION D'ENERGIE DANS LES SITES ISOLÉS AU CANADA.....	1
1.2 ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES HYBRIDES AVEC STOCKAGE.....	7
1.3 ÉTAT DE L'ART SUR LA TECHNOLOGIE SHEDAC.....	11
1.4 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DU TRAVAIL	19
1.5 STRUCTURE DU MEMOIRE.....	23
CHAPITRE 2 Simulation Tool for a Hybrid Wind-Diesel System With CAES.....	26
2.1 RESUME DE L'ARTICLE 1	26
CHAPITRE 3 Influence of Compressed Air Storage Parameters on Wind-Diesel System Performance	66
3.1 RESUME DE L'ARTICLE 2	66

CHAPITRE 4 Feasibility study for a Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage for a Remote Site in Canada	96
4.1 RESUME DE L'ARTICLE 3	96
CHAPITRE 5 Élaboration de nouvelles stratégies d'opération	134
5.1 OBJECTIFS	134
5.2 ANALYSE PARAMETRIQUE	135
5.3 ÉLABORATION DES STRATEGIES D'OPERATION	142
5.4 ÉTUDE DE LA STRATEGIE DE SECURITE	145
5.5 ÉTUDE DE LA STRATEGIE DE DISTRIBUTION DES CHARGES DES GENERATRICES.....	153
5.6 ÉTUDE DE LA STRATEGIE D'UTILISATION DE L'AIR COMPRIME EN TOUT TEMPS	160
5.7 CONCLUSION	164
CHAPITRE 6 Synthèse, conclusions et perspectives	167
6.1 SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS AU COURS DE MON ETUDE	167
6.2 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	172
Annexe I Algorithme de fonctionnement de la stratégie de sécurtié	177

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Informations sur la présence des sites isolés au Québec[4].....	2
Tableau 5.1 : Influence du modèle et du nombre d'éoliennes sur la consommation de diesel du SHEDAC	139
Tableau 5.2 : Influence du modèle et du nombre de génératrices sur la consommation de diesel du SHEDAC	141
Tableau 5.3 : Comparaison des solutions envisagées pour répondre à la problématique de sécurité du système	149
Tableau 5.4 : Résultats des simulations pour le système avec stratégie de sécurité et le système de base.....	150
Tableau 5.5 : Résultats des simulations pour la stratégie de répartitions des charges.....	159
Tableau 5.6 : Résultats des simulations pour la nouvelle stratégie de gestion d'air	164

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Cartes des communautés isolées au Canada (étoiles vertes) et des réseaux de distribution électrique principaux (en rouge) [2]	1
Figure 1.2: Répartition des puissances électriques installées dans les communautés éloignées au Canada [2]	4
Figure 1.3: Variation de la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse du vent [2]	13
Figure 1.4: Schéma d'une installation d'un SHEDAC à petite échelle [3]	15
Figure 1.5: Schéma d'une installation d'un SHEDAC à moyenne échelle [3]	16
Figure 1.6: Schémade principe – Admission directe dans le moteur [3]	16
Figure 1.7: Schéma du micro réseau réalisé au Techno Centre Éolien [54]	19
Figure 5.1 : Influence du TPP sur la consommation de diesel du SHEDAC.....	138
Figure 5.2 : Influence de la vitesse du vent sur la consommation de diesel du SHEDAC	139
Figure 5.3 : Influence du rapport air/fuel sur la consommation de diesel du SHEDAC ...	143
Figure 5.4 : Analyse des répartitions de charge possibles	156
Figure 5.5 : Algorithme de fonctionnement de la stratégie de répartition des charges	158
Figure 5.6 : Algorithme de fonctionnement de la stratégie d'utilisation de l'air en tout temps	163

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CPP	Contribution de la Puissance Pneumatique.
SHEDAC	Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage par Air Comprimé.
TPP	Taux de Pénétration en Puissance éolienne.
TPE	Taux de Pénétration en Énergie éolienne.
CAES	Compressed Air Energy Storage.

LISTE DES SYMBOLES

ρ_{fuel}	Masse volumique du diesel (kg/L)
E_{air}	Énergie disponible dans une quantité d'air comprimé (kWh).
E_{annuelle}	Énergie produite en une année (kWh).
$E_{\text{consommée}}$	Énergie consommée en une année (kWh).
E_{fuel}	Énergie disponible dans une quantité de diesel (kWh)
k	Constante de conversion de l'énergie en kWh
n	Nombre polytropique
N_c	Nombre d'étages du compresseur
P_a	Pression de l'air (bar)
P_{max}	Puissance maximale produite ou consommée (kW).
P_{stockage}	Pression de stockage (bar)
PCI_{fuel}	Pouvoir calorifique inférieur du diesel (kJ/kg)
V_{air}	Volume d'air comprimé (L)
V_{fuel}	Volume de diesel (L)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 GENERALITES SUR LA PRODUCTION D'ENERGIE DANS LES SITES ISOLEES AU CANADA

1.1.1. Mise en contexte des sites isolés au Canada

Compte tenu de la superficie du territoire et de la diversité géographique, le Canada regroupe environ 300 communautés éloignées, abritant plus de 200,000 personnes [1]. Tel qu'illustré dans la Figure 1.1, ces communautés sont dispersées partout dans le pays avec une forte concentration dans les territoires du Yukon, Nunavut, les Territoires du Nord-Ouest et les îles. La figure indique également les réseaux de distribution électrique principaux. Ce dernier élément permet de mettre en évidence le grand éloignement de la plupart des sites par rapport aux sources de distribution.



Figure 1.1: Cartes des communautés isolées au Canada (étoiles vertes) et des principaux réseaux de distribution électrique (en rouge) [2]

Par définition, les sites, les régions, les communautés ou villages considérés comme isolés, sont les zones correspondantes à l'un des critères suivants [3] :

- a) La zone n'est pas ou ne peut pas être reliée au réseau public de distribution d'électricité ou de gaz naturel de longue distance ou au moyen de la génération conventionnelle ;
- b) Il s'agit d'une agglomération permanente ou établie pour au moins 5 ans, qui compte au moins dix habitants.

À ces zones, il faut également rajouter de nombreuses installations techniques (tours et relais de télécommunication, systèmes météorologiques...), touristiques (pourvoiries, chalets...), agricoles et piscicoles qui ne sont pas connectées aux réseaux de distribution principaux. À l'image du reste du pays, le Québec possède de nombreuses communautés isolées dont le chiffre n'est pas à négliger comme le démontre le Tableau 1.1.

Tableau 1.1: Informations sur la présence des sites isolés au Québec [4]

Régions	Nombre de communautés	Nombre d'habitants
Nouveau-Québec	15	8383
Haute-Mauricie	9	5735
Basse-Côte-Nord	15	5811
Iles de la Madeleine	8	14232

Bien que lors des quinze dernières années le nombre de ces zones ait diminué, la population n'a cessé d'augmenter et la demande d'approvisionnement énergétique

également [5]. Ce dernier élément permet d'introduire les limites énergétiques auxquelles font face les sites isolés et les solutions à envisager pour les résoudre [2, 6, 7, 8].

1.1.2. Problématiques énergétiques des sites isolés

La spécificité des communautés éloignées tient de l'absence de connexion à un réseau de distribution principal d'électricité ou de gaz. Cette situation s'explique bien souvent par le caractère géographique (montagnes, îles...) de ces sites qui empêche ou rend trop onéreux le raccordement aux réseaux principaux. Ces coûts prohibitifs sont dus à l'installation des lignes électriques sur des distances trop importantes ainsi qu'aux pertes qui en découlent lors de la distribution de l'électricité [9].

Pour ces raisons, ces communautés se sont munies de technologies leur permettant de produire et consommer leur propre énergie. Malheureusement, la principale source d'électricité dans la plupart de ces régions n'est pas renouvelable et provient de génératrices fonctionnant au diesel. Bien qu'il s'agisse d'une source fiable, stable et continue en énergie, son utilisation entraîne trois problèmes principaux : énergétique, économique et environnemental.

a) Problématique énergétique :

La capacité diesel-électrique dans ces communautés est loin d'être négligeable puisqu'elle avoisine les 400 MW (Figure 1.2) sur l'ensemble du pays. Dans la province même du Québec, cette capacité s'élève à 144 MW et les dernières estimations projetaient ce chiffre à presque 160 MW pour l'année 2015 [10]. Ainsi, la production totale des génératrices dans les sites isolés au Québec est estimée à 300 GWh par année [1, 2, 4, 6].

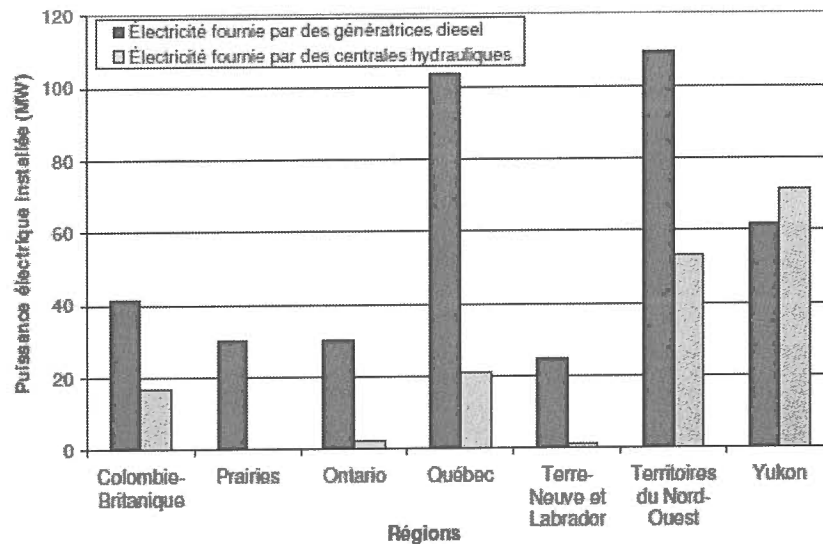


Figure 1.2: Répartition des puissances électriques installées dans les communautés éloignées au Canada [2]

La Figure 1.2 démontre, ainsi, que toutes ces régions sont très dépendantes des génératrices diesel pour produire leur électricité. Néanmoins, cette ressource énergétique devient de plus en plus limitée, posant un réel problème pour le futur. De plus, l'importation du carburant, qui n'est pas disponible directement sur place, ajoute une contrainte supplémentaire. La question de la dépendance énergétique de ces régions est, donc, très importante. Enfin, il est à noter que l'utilisation des génératrices n'est pas toujours efficace, avec un faible taux d'utilisation, ce qui entraîne des usures prématurées et des surconsommations de carburant [11]. Pour ces raisons, l'utilisation unique des génératrices diesel comme source d'énergie n'est, donc, plus une solution viable.

b) Problématique économique :

L'usage des génératrices diesel coûte extrêmement cher à cause des fortes consommations de carburant et de l'acheminement de celui-ci, qui varie en fonction de

l'éloignement des sites ainsi que du moyen de transport (voies terrestres, aériennes ou maritimes). Les pertes annuelles estimées par Hydro Québec s'élèvent à près de 133 millions de dollars, résultantes de la différence entre le prix de revient de l'électricité dans les sites isolés et celui dans le reste du Québec. En effet, les coûts des biens et services dans ces régions, dont ceux de l'électricité, peuvent varier de deux à cinq fois plus que ceux du reste de la province [6-7]. Ainsi, en 2014, le coût de l'électricité dans ces régions pouvait s'élever à près de 1,3 \$/kW contre 0,06 \$/kW dans les zones principales [5]. Avec l'augmentation constante du prix du pétrole, cet écart ne semble pas vouloir diminuer dans les années à venir.

c) Problématique environnementale :

Outre les problèmes financiers et de ressources, l'impact environnemental lié à l'usage des génératrices diesel est significatif. En effet, cette technologie est une source émettrice de gaz à effet de serre (GES) non négligeable [10]. De plus, la détérioration et le vieillissement de ces machines tendent à accentuer ce phénomène, ce qui pousse d'autant plus à chercher de nouvelles solutions. Bien que moins discutée, mais tout aussi grave, l'impossibilité de recycler directement ces génératrices pousse les usagers à les laisser déperir dans un coin, entraînant des phénomènes de rouille et polluant, ainsi, les sols au fil du temps.

Après avoir fait le bilan des différentes problématiques relatives à l'usage des génératrices diesel pour l'électrification des sites isolés, il est simple de comprendre qu'il est important de trouver des solutions alternatives qui permettront de diminuer l'utilisation de ces machines (et donc du carburant), et de réduire également l'émission des GES.

1.1.3. Solutions énergétiques envisagées et développées

Bien que les problèmes subsistent encore, la recherche de nouvelles solutions ne date pas d'hier et de nombreuses études ont été réalisées au cours de la dernière décennie [4, 6, 9, 12]. Ainsi, l'utilisation des énergies renouvelables est devenue une des solutions les plus efficaces. En effet, pour pallier aux problématiques de disparitions de certaines ressources, seuls des « carburants » naturels et renouvelables peuvent être utilisés [12].

Au Canada et plus précisément au Québec, la diversité du territoire permet de profiter de différentes ressources dont les principales sont l'hydraulique, l'éolien et le solaire. Si l'hydroélectricité est l'énergie la plus développée depuis longtemps, les énergies éolienne et solaire ne cessent de se développer [13-15]. Elles paraissent, d'ailleurs, bien adaptées pour des configurations isolées. Bien que les coûts d'installation des systèmes à énergies renouvelables aient, longtemps, été un frein dans les communautés éloignées, les améliorations des dernières années et la chute des prix du matériel permettent, maintenant, leur implantation. Cependant, l'utilisation pure et simple d'une seule de ces énergies n'est pas encore envisageable. En effet, l'inconvénient de ces technologies est qu'elles sont dépendantes de la ressource qu'elles exploitent et donc, des fluctuations de celle-ci [16]. Dans le cas de l'alimentation d'un village éloigné, l'usage d'une source d'énergie fluctuante seule n'est pas fiable du point de vue technique et sécurité d'approvisionnement en électricité. C'est pourquoi il a été indispensable d'imaginer des systèmes hybrides d'énergie.

Un système hybride se distingue de deux façons [1] :

- a) Il possède et exploite au moins deux types de technologies de production (ex : éolien-diesel, éolien-photovoltaïque, éolien-diesel-stockage, etc.) ;
- b) Sa complexité spécifique au niveau de la gestion des apports est, à bien des égards, identique à celui d'un réseau électrique traditionnel.

De plus, un système hybride destiné pour l'électrification des régions isolées doit [4] :

- a) Assurer en tout temps un approvisionnement électrique de la charge suffisant et de qualité déterminée ;
- b) Obéir à des règles d'exploitation en temps réel basées sur une priorisation économique des ressources énergétiques disponibles ;
- c) Compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir constamment la stabilité du système et la transition entre les différentes sources d'énergie.

L'obligation de respecter ces règles explique pourquoi il n'est pas possible de créer un système hybride avec uniquement des ressources renouvelables. L'utilisation d'une ressource stable et disponible en tout temps est, alors, indispensable. C'est pourquoi les systèmes actuellement réalisés ou en développement utilisent une source conventionnelle (génératrice diesel) et une source renouvelable (éolien, solaire...) et éventuellement un système de stockage. Ainsi, il est possible de créer un grand nombre de combinaisons permettant la mise en place d'un système hybride fonctionnel. Cependant, en raison de facteurs technico-économiques propres aux sites isolés (et qui varient encore d'un site à l'autre), le nombre de possibilités est très vite restreint.

1.2 ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES HYBRIDES AVEC STOCKAGE

L'hybridation entre des sources d'énergies renouvelables et des génératrices diesel (avec ou sans stockage) se présente comme la meilleure alternative pour l'alimentation en électricité des zones isolées. Ainsi, de nombreux projets de recherche, visant à trouver des technologiques toujours plus efficaces, ont été menés depuis plusieurs années. Un état de l'art pertinent a, donc, été réalisé pour rendre compte de l'avancement de ces technologies

et en dégager les points qu'il reste encore à améliorer afin d'obtenir des systèmes encore plus performants. Cette revue permet notamment d'entrevoir l'évolution des informations suivantes :

- a) Le choix des technologies alternatives aux génératrices diesel ;
- b) Le type de stockage à envisager ;
- c) La gestion et le contrôle des flux énergétiques dans ces types de systèmes.

1.2.1. Systèmes hybrides éolien-diesel

L'utilisation de l'énergie éolienne en supplément des génératrices diesel est l'une des premières alternatives qui a été envisagée. Ce choix peut s'expliquer pour deux raisons principales. D'une part, étant donné l'usage dans des zones souvent désertes, l'implantation d'une ou plusieurs éoliennes ne présente bien souvent pas de contraintes particulières [17-19]. D'autre part, la complémentarité entre le besoin de réduire l'utilisation des diesels et le grand potentiel éolien disponible dans ces sites est un grand avantage en faveur de l'utilisation de l'énergie éolienne. Ainsi, durant les années 90, des premiers projets de recherche ont émergé, visant l'étude de systèmes éolien-diesel. Dans un mémoire réalisé pour l'Université de Terre-Neuve, une réflexion sur une stratégie de contrôle de l'énergie y est étudiée [20]. Quelques années plus tard, de nouveaux projets ont été présentés avec pour objectifs l'implantation réelle de ces systèmes en Alaska [21] ou dans les Îles de la Madeleine au Canada [11]. Ces deux projets permettent d'entrevoir les différentes solutions envisageables pour l'hybridation puisque, dans le premier des batteries viennent compléter le jumelage éolien-diesel alors que le deuxième se contente de l'usage des sources productrices. La nécessité de stratégies d'opération y est également discutée dans le but de diminuer l'usage des génératrices diesel.

Bien que les systèmes hybrides éolien-diesel présentent de nombreux avantages, cette technologie peut, néanmoins, rencontrer certaines problématiques. Par exemple, dans

une telle configuration, si la puissance éolienne disponible est plus élevée que la charge, une partie de cette puissance doit alors être délestée. Ce phénomène entraîne, donc, une forte dissipation de puissance qui aurait pu être utilisée à travers un procédé annexe. C'est dans le but de réduire cette problématique, et d'augmenter la part d'énergie renouvelable dans la production totale que des systèmes de stockage ont été envisagés, tels que présentés dans la sous-partie 1.2.3.

1.2.2. Implantation de sources énergétiques additionnelles

Si l'éolien se présente comme la source la plus adéquate en alternative aux génératrices diesel, la réflexion sur l'implantation d'autres sources a, cependant, fait l'objet de nombreuses études. Différents travaux ont, ainsi, été réalisés visant à utiliser d'autres sources d'énergies renouvelables comme le solaire photovoltaïque ou l'hydroélectricité.

Envisager l'utilisation de plusieurs sources renouvelables doit permettre de diminuer encore la part de la génératrice diesel dans un système. Cependant, une telle configuration n'est pas sans contrainte puisque cela nécessite un investissement et un espace supplémentaires ainsi qu'une gestion plus complexe. Pour ces raisons, le couplage avec une centrale hydraulique reste encore limité et peu répandu [22-23]. C'est pourquoi le solaire photovoltaïque se présente comme la meilleure énergie complémentaire à l'éolien pour l'hybridation avec des génératrices diesel. Dès le début des années 2000, des études ont été réalisées pour se rendre compte de la faisabilité d'une telle hybridation et de la façon de dimensionner et optimiser un tel système [24-25]. Depuis, toute une série de nouveaux articles est apparue pour la modélisation d'un système qui est très étudié notamment pour l'usage sur le territoire africain, là où le climat est propice à l'utilisation de l'énergie solaire [27-28]. Dans la majorité, la question de la répartition des flux énergétiques est plus ou moins envisagée. Néanmoins, une étude plus récente a permis d'obtenir des indications sur une gestion optimale d'un système hybride éolien-photovoltaïque-diesel avec stockage par batterie [29].

1.2.3. Incorporation d'unités de stockage d'énergie – L'air comprimé comme solution

Outre les sources à caractère renouvelable, une autre solution pour diminuer la part des génératrices diesel est l'utilisation d'unités de stockage. Le stockage, quelle que soit sa forme, permet d'emmagasiner l'énergie renouvelable excédentaire, lorsque la demande en énergie est plus faible que la production. Cette énergie stockée est restituée, directement ou indirectement, sous forme d'électricité [30]. Il serait, alors, possible de réduire encore l'utilisation des génératrices diesel [31]. La technologie de stockage la plus répandue jusqu'à maintenant, et la plus utilisée, est le stockage par batteries électrochimiques. La bonne connaissance de ce type de stockage (notamment dans le domaine automobile) explique pourquoi la plupart des études ont souvent favorisé son usage [28, 29, 32-33]. Néanmoins, la multitude de technologies de stockage existantes a fait l'objet de plusieurs recherches. L'objectif étant de trouver une façon de stocker le maximum d'énergie tout en optimisant au mieux le coût d'un tel système ainsi que son encombrement [32, 34-36]. Ainsi, les principaux types de stockage d'énergie sont les suivants [36] :

- a) Le stockage sous forme chimique. Tel que mentionné auparavant, il s'agit d'un des procédés les plus utilisés à ce jour. Ce système est basé sur des réactions électrochimiques [25-27] ;
- b) Le stockage sous forme gravitaire. Ce système, de type hydraulique, est utilisé dans des centrales de pompage-turbinage afin d'emmagasiner l'énergie lors des périodes creuses et de la restituer lors des périodes de pointe [3, 27] ;
- c) Le stockage sous forme d'énergie cinétique (ou volant d'inertie). Comme la précédente, il s'agit d'un stockage mécanique. Ici, l'énergie est stockée à travers la rotation d'un élément autour d'un axe [3, 27, 37-39] ;
- d) Le stockage sous forme d'hydrogène. Mettant en œuvre une pile à combustible, l'utilisation de ce système est principalement étudiée dans le domaine de l'automobile [3, 27] ;

- e) Le stockage sous forme thermique. Ce procédé peut être mis en œuvre de différente façon : lors du chauffage d'un corps avec changement d'état (chaleur latente) ou lors du chauffage d'un corps sans changement d'état (chaleur sensible). Cette technologie se retrouve dans le fonctionnement des centrales solaires thermiques [3, 27] ;
- f) Le stockage sous forme d'énergie de pression. Adapté pour des installations de grandes puissances mais aussi pour des faibles puissances, ce procédé, sous forme d'air comprimé, permet d'emmagasiner l'énergie excédentaire à l'aide de réserves de stockage naturelles ou superficielles [3, 27].

Dans le but de dégager une solution optimale parmi la multitude de procédés existants, une étude, établie par plusieurs laboratoires au Québec, a présenté une analyse paramétrique entre neuf technologies de stockage [40-41]. Visant à savoir quel type de stockage serait le plus adapté à un système éolien-diesel, cette étude a démontré que le stockage par air comprimé se présente comme la meilleure solution. En effet, au regard du coût, de la simplicité, de la contribution à la diminution de la consommation de carburant et des émissions de GES, de la durée de vie et d'autres facteurs technoeconomiques, cette technologie semble optimale par rapport aux autres systèmes de stockage. Les recherches de ces dernières années, jusqu'aux plus récentes, concernent, donc, l'élaboration et l'optimisation d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC) [3,4, 37-39, 42].

1.3 ÉTAT DE L'ART SUR LA TECHNOLOGIE SHEDAC

1.3.1. *Catégorisation de la technologie SHEDAC*

Afin de mieux envisager les particularités de la technologie SHEDAC, il est nécessaire d'introduire différentes notions propres aux systèmes hybrides telles que le taux de pénétration en énergie renouvelable, ici l'éolien, par rapport au besoin du système. En

effet, les systèmes comme le SHEDAC peuvent se différencier en fonction du taux de pénétration en puissance ou en énergie éolienne [43]. Ainsi, le taux de pénétration en puissance éolienne (TPP) maximal d'un système est défini comme le rapport entre la puissance maximale que peut produire le parc éolien et la puissance maximale de la charge. Le TPP se calcule, alors, comme suit :

$$TPP = \frac{P_{max}^{éolienne}}{P_{max}^{charge}}$$

De la même façon, le taux de pénétration en énergie éolienne (TPE) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle et l'énergie consommée annuellement par la charge, soit :

$$TPE = \frac{E_{annuelle}^{éolienne}}{E_{consommée}^{charge}}$$

Pour un site donné, le TPP dépend, donc, du nombre et de la puissance unitaire des éoliennes installées alors que le TPE dépend du TPP ainsi que de la vitesse et de la fréquence du vent sur le site. À partir de ces informations, il serait, alors, possible de définir les classes et les modes opératoires du SHEDAC comme suit [16] :

- a) À faible pénétration en énergie éolienne : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 5 et 50% et le TPE est inférieur à 20%. Dans ce cas-là, la ressource éolienne permet juste de diminuer légèrement l'utilisation des génératrices diesel, mais celles-ci restent, bien souvent, toujours en fonctionnement.
- b) À moyenne pénétration en énergie éolienne : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 50% et 100% et le TPE est compris entre 20% et 40%. Bien que les génératrices restent toujours en fonctionnement, la part d'énergie éolienne devient plus importante grâce au système de stockage qui peut être sollicité en cas de surproduction des éoliennes.

- c) À haute pénétration en énergie éolienne : cela concerne les systèmes dont le TPP est compris entre 100% et 400% et le TPE est compris entre 40% et 100%. Dans ce cas-là, dès lors que la vitesse de vent le permet, la production éolienne peut prendre le dessus sur les génératrices diesel, jusqu'à même leur arrêt. Une gestion complexe est, donc, nécessaire afin d'anticiper les variations brusques de la vitesse de vent, la dissipation d'une surproduction éventuelle (en cas de forts vents), et la mise en marche/arrêt des génératrices si nécessaire.

De manière générale, la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse de vent peut être représentée comme suit (Figure 1.3) [44] :

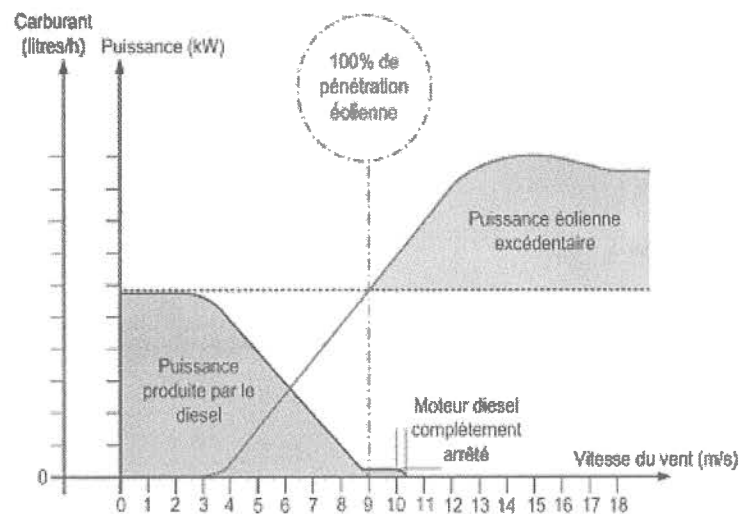


Figure 1.3: Variation de la part d'utilisation des génératrices diesel et des éoliennes en fonction de la vitesse du vent [1]

1.3.2. Types du SHEDAC

Maintenant que la technologie SHEDAC a été introduite avec les notions du taux de pénétration en puissance et en énergie éolienne, il est possible de rentrer plus en détail sur le fonctionnement et la gestion d'un tel système, ainsi que sur les sous-systèmes qui le

composent. Pour ce faire, il est possible de présenter la technologie sous différents volets en fonction de l'application. Des systèmes à petite échelle et à moyenne échelle peuvent, alors, être distingués [3].

a) SHEDAC à petite échelle :

L'utilisation d'un tel système hybride est proposée pour des applications à petites échelles comme des stations de télécommunication ou des petits sites isolés déjà alimentés par des génératrices diesel [45]. La technologie consiste alors en l'utilisation d'une petite centrale éolienne comme source d'appoint couplée à un moteur d'air comprimé équipé de deux machines (pneumatique et électrique). Le principe de fonctionnement de ce système est alors le suivant : lorsque le $TPP > 1$, l'énergie éolienne excédentaire est utilisée par un alternateur permettant d'entraîner le compresseur afin de recharger les réservoirs d'air comprimé. Si l'énergie éolienne est insuffisante ($TPP < 1$), l'air comprimé est alors détendu dans la machine pneumatique, entraînant alors, l'alternateur pour fournir de l'électricité. Dans de telles configurations, la génératrice diesel n'est utilisée que si la centrale éolienne et le dispositif de stockage ne peuvent assurer les besoins énergétiques. Le schéma de principe de ce système est présenté dans la Figure 1.4. Il est important de souligner que ce genre d'hybridation permet de diminuer la consommation en carburant et de remplacer le démarrage intermittent des génératrices diesel, permettant ainsi de diminuer leur usure ainsi que les frais d'entretien [3,45].

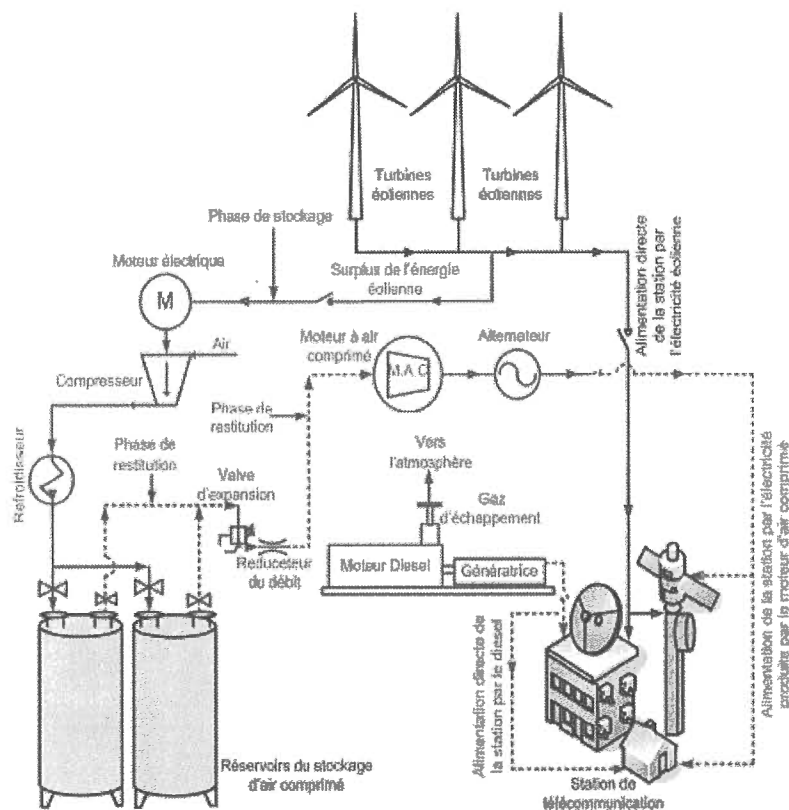


Figure 1.4: Schéma d'une installation d'un SHEDAC à petite échelle [3]

b) SHEDAC à moyenne échelle :

Ce genre d'hybridation est utilisé dans le cas des applications isolées de moyenne et grande échelle dont l'utilisation de génératrices diesel est inévitable [1,3]. La situation géographique provoque, ainsi, des coûts prohibitifs pour le transport du carburant. Comme précédemment, le principe de cette technologie consiste à mettre en œuvre une centrale éolienne ainsi qu'un système de stockage par air comprimé. Cependant, l'air comprimé stocké ne sera pas utilisé ici comme source énergétique directe mais plutôt pour améliorer les performances des génératrices diesel, tout en augmentant le taux de pénétration de l'énergie éolienne (Figure 1.5). Il s'agit, alors, de la « suralimentation supplémentaire » des moteurs diesel [3, 42-43, 45].

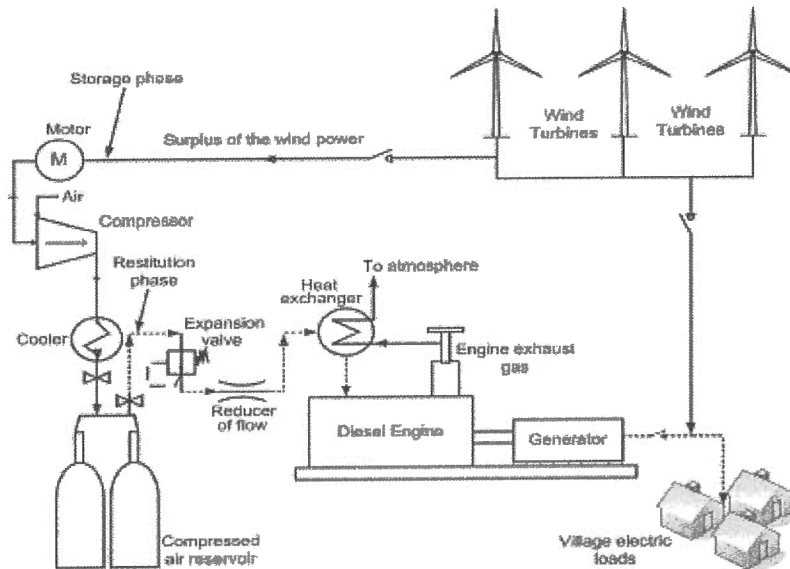


Figure 1.5: Schéma d'une installation d'un SHEDAC à moyenne échelle [3]

Le procédé de suralimentation consiste à élever la masse volumique de l'air à l'admission des moteurs pour en augmenter leur puissance spécifique (puissance par unité de cylindrée) [46]. Ainsi, lorsque le $TPP > 1$, le surplus de l'énergie éolienne est utilisé pour comprimer l'air qui est ensuite stocké. Dès lors que c'est nécessaire, l'air comprimé sert à suralimenter le moteur diesel afin d'en augmenter sa puissance. Cela permet, donc, de diminuer la consommation en combustible et de diminuer l'usure des moteurs. Différentes études et publications ont ainsi été réalisées dans le but de trouver la meilleure manière de suralimenter les génératrices [3]. De ces travaux ont été déduites les différentes alternatives de suralimentation suivantes :

- Utilisation d'une turbine en série sur l'axe du turbocompresseur ;
- Double étage de suralimentation ;
- Admission en amont du compresseur ;

- Admission directe dans le moteur (Figure 1.6) ;
- Suralimentation Hyperbar ;
- Suralimentation avec un cycle de Lenoir pressurisé ;
- Suralimentation avec downsizing.

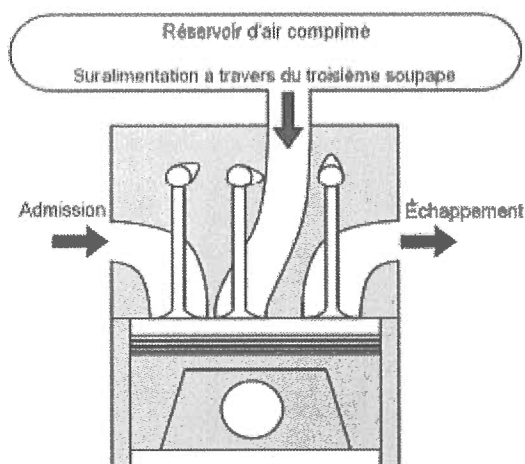


Figure 1.6 : Schéma de principe - admission directe dans le moteur [3]

À travers ces solutions, la réflexion sur l'utilisation d'un moteur avec de l'air comprimé ne s'est pas limitée à la suralimentation puisqu'il a été montré que les usages en mode pneumatique ou hybride-pneumatique peuvent s'avérer être des solutions pertinentes.

1.3.3. Travaux et études réalisés sur le SHEDAC

Même si l'optimisation du couplage entre l'air comprimé et la génératrice diesel fait encore l'objet de différentes recherches, la réalisation d'études de dimensionnement et de faisabilité d'un SHEDAC a permis jusqu'à maintenant d'obtenir différents résultats permettant la validation de l'efficacité d'un tel système [3, 35, 5, 47-48, 51-52]. Dans chaque cas d'étude, il a été démontré que l'utilisation d'un système hybride éolien-diesel

avec stockage par air comprimé permet de réduire de façon non négligeable la fréquence d'opération des génératrices et par conséquent de diminuer la consommation en diesel.

De plus, à travers les travaux de recherche sur cette technologie, il est intéressant d'étudier la gestion des flux énergétiques. Cela s'explique en effet par deux raisons : d'une part, la technologie de stockage en elle-même nécessite un certain contrôle de la puissance entrante, et d'autre part, l'utilisation de la réserve d'air peut se faire de différentes façons selon l'utilité, la disponibilité et le besoin. Il peut être, alors, compris tout l'enjeu qui en découle puisqu'une multitude de modes de fonctionnement peuvent être envisagés en fonction de la puissance installée, des systèmes utilisés et de la demande du consommateur. Actuellement, on dénombre quelques travaux qui se sont déjà penchés sur la question des stratégies d'opération pour un SHEDAC [29, 43, 52-53]. Dans la plupart de ces études, une élaboration de stratégies pertinentes est réalisée et l'on peut dégager deux stratégies récurrentes : la première priorisant l'utilisation des génératrices diesel, la deuxième priorisant l'énergie éolienne. L'utilisation des puissances et de la technologie de stockage est, alors, différente en fonction de la stratégie envisagée.

Outre la variété des travaux de recherche effectués, le besoin d'un banc d'essai pour un tel système est devenu nécessaire pour passer à une étape supérieure. Le TechnoCentre éolien, situé à Gaspé au Québec, a ainsi mis en place l'une des premières installations qui permet d'étudier de façon réelle le comportement d'un SHEDAC [54]. La Figure 1.6 illustre le micro réseau mis en place par le TechnoCentre, permettant l'utilisation de la technologie SHEDAC.



Figure 1.7: Photo du micro réseau réalisé au TechnoCentre éolien [54]

1.4 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DU TRAVAIL

1.4.1 Objectifs du projet de recherche global et de ce mémoire

Le présent mémoire fait l'objet d'un projet de recherche plus global visant à faire l'étude, la recherche, la conception, l'optimisation et le développement d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC). L'ensemble de ces travaux est réalisé dans l'optique d'une implantation réelle d'un SHEDAC au sein d'un site isolé situé au Nord du Québec. Les différents choix de données et de paramètres sont, donc, orientés pour cette application, tout en présentant un caractère général pour l'adaptation à d'autres études. L'un des objectifs principaux du présent projet a été de concevoir et valider un outil universel de dimensionnement d'un SHEDAC afin de l'utiliser pour la conception

de ce système pour diverses applications et différentes tailles. Cet outil a, ensuite, été utilisé pour l'étude de l'implantation énergétique du système pour le site qui fait l'objet du projet global. Il a, également, été utilisé afin d'élaborer de nouvelles stratégies d'opération visant à optimiser l'efficacité du système. Les différents objectifs principaux peuvent être divisés en trois sous-objectifs :

- a) Développer un outil/logiciel de dimensionnement d'un SHEDAC qui permettra une étude technico-énergétique globale pour de nombreuses configurations possibles. Sa conception devra faire l'objet d'une recherche approfondie des différents modèles et techniques existants pour la mise en place de sous-systèmes tels que les éoliennes, la génératrice diesel, le processus de suralimentation, et le système de stockage d'énergie sous forme d'air comprimé (compresseur, réservoir...). Une validation des simulations sera nécessaire pour attester de la véracité des résultats obtenus ;
- b) Utiliser l'outil développé pour l'application sur le cas d'étude du projet global. Une analyse paramétrique des différents systèmes envisageables sera réalisée, à partir du logiciel, pour en déterminer le système optimal d'un point de vue énergétique ;
- c) Élaborer de nouvelles stratégies d'opération du SHEDAC dans le but d'optimiser son efficacité, en s'adaptant à diverses contraintes techniques qui peuvent apparaître. Le logiciel et les résultats qui en découlent pourront être mis à profit afin d'implanter, simuler et analyser ces stratégies.

1.4.1 Méthodologie

La méthodologie définie pour la réalisation des objectifs présentés précédemment est établie en plusieurs étapes et sous étapes à respecter :

A. Développement d'un outil universel pour le dimensionnement technique et énergétique d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé :

- a) État de l'art des différents logiciels existants pour le dimensionnement de systèmes hybrides afin d'attester de la nécessité de développer un outil unique pour la conception préalable d'un SHEDAC ;
- b) Recherche des modèles existants pour les sous-systèmes : éolien, génératrice diesel et système de stockage. Les modèles déjà utilisés dans des études ultérieures sur le SHEDAC seront privilégiés pour s'assurer d'obtenir des modélisations pertinentes ;
- c) Modélisation des sous-systèmes et programmation de l'outil. Cette étape devra également faire ressortir les logiques de fonctionnement retenues pour les simulations réalisables ;
- d) Validation de la véracité des résultats proposés par le logiciel. En utilisant des outils dont la fiabilité a déjà été acceptée par la communauté scientifique, il s'agira de valider la pertinence des modèles choisis, des logiques d'opération établies et des résultats obtenus.

B. Analyse des performances liées au système de stockage et optimisation d'un système hybride de type éolien-diesel avec stockage par air comprimé :

- a) Mise en évidence de l'intérêt de réaliser une analyse des performances du SHEDAC basée sur l'influence des paramètres de stockage ;
- b) Réalisation, avec l'aide du logiciel développé, d'une analyse des performances. Celle-ci sera réalisée en faisant varier différents paramètres liés au stockage (pression, volume, rendements, etc.) dans l'objectif de

démontrer l'importance du dimensionnement du sous-système de stockage et de concevoir un système performant ;

- c) Optimisation technique d'un SHEDAC, pour un site isolé, basée sur le paramétrage optimal du système de stockage. Pour ce faire, les conclusions de l'analyse des performances et la mise en place de critères d'optimisation devront être utilisées.

C. Dimensionnement d'un SHEDAC pour une application en site isolé, à l'aide du logiciel développé :

- a) Analyse de la situation énergétique du site étudié et de ses ressources afin de dégager la pertinence de l'utilisation d'un SHEDAC dans une telle configuration ;
- b) Proposition de réduction de la consommation électrique du site. Dans une logique d'efficacité énergétique globale, il est nécessaire de chercher d'abord, à réduire certains postes de consommation avant d'implanter un nouveau système de production d'énergie ;
- c) Modélisation de différentes solutions de SHEDAC possibles. En tenant compte des différents facteurs énergétiques, météorologiques et matériels, il s'agira de proposer plusieurs alternatives possibles. Une analyse comparative permettra de dégager la solution optimale d'un point de vue technique et énergétique ;
- d) Évaluation générale de la solution retenue afin de proposer en détail les avantages énergétiques obtenus par rapport à la situation actuelle.

D. Élaboration de nouvelles stratégies d'opération du SHEDAC :

- a) Analyse des différents paramètres techniques et contraintes opérationnelles pouvant influencer l'efficacité du système ;
- b) Mise en place de différentes stratégies d'opération en se basant sur les résultats et conclusions de la sous-étape précédente ;
- c) Implantation et simulation des stratégies qui auront été définies. Le logiciel développé sera, alors, utilisé ;
- d) Analyse des résultats obtenus et conclusions sur les bénéfices des stratégies développées.

E. Élaboration de recommandations pour la suite des travaux à effectuer sur une base expérimentale et des améliorations ou ajouts possibles sur le logiciel développé.

1.5 STRUCTURE DU MEMOIRE

Le présent mémoire est produit en quasi-totalité « par articles ». Ainsi, les différents articles soumis ou publiés dans des journaux scientifiques avec comités de lecture, et les études adjacentes, sont en phase avec la méthodologie décrite dans la partie 1.4 présentée précédemment.

Le chapitre 1 présente l'introduction, la problématique et les objectifs du mémoire. Il permet ainsi de mettre en contexte le sujet du mémoire, tout en présentant un état de l'art sur les travaux déjà réalisés dans le domaine des systèmes hybrides en énergie. Une présentation détaillée des objectifs et de la méthodologie démontre, ensuite, la façon dont la problématique sera traitée et quelles sont les études proposées à travers le mémoire.

Le chapitre 2 présente le premier article intitulé « Simulation Tool for a Hybrid System Wind-Diesel with CAES » et est le résultat de la sous-étape « A » de la méthodologie. Il y est présenté toutes les étapes qui ont été nécessaires pour l'élaboration du logiciel de dimensionnement d'un SHEDAC, soient : un état de l'art des outils de dimensionnement de systèmes hybrides existants, la présentation des modèles des sous-systèmes utilisés et la validation des résultats obtenus. Finalement, une étude de cas pour un système « idéal » est réalisée afin de rendre compte des performances du SHEDAC.

Le chapitre 3 présente le deuxième article intitulé « Influence of Compressed Air Storage Parameters on Wind-Diesel System Performance » et est le résultat de la sous-étape « B » de la méthodologie. Ce chapitre est en relation directe avec la sous-étape « A » puisque les analyses proposées sont réalisées grâce à l'utilisation du logiciel développé précédemment. À travers cette partie, une analyse de performance est réalisée afin d'étudier l'influence des paramètres de stockage sur l'efficacité du système. En tenant compte des résultats obtenus, une optimisation technique d'un SHEDAC est proposée. Cette étude tient compte de l'élaboration d'un sous-système de stockage optimal basé sur des critères d'optimisation bien définis.

Le chapitre 4 présente le troisième article intitulé « Feasability Study for a Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage for a Remote Site in Canada » et est le résultat de la sous-étape « C » de la méthodologie. Ce chapitre est en relation étroite avec les sous-étapes « A » et « B » puisque sa réalisation est faite grâce à l'utilisation du logiciel développé préalablement et en tenant compte des conclusions issues des analyses de performance. Dans cette partie, on traite ainsi d'une étude d'implantation de SHEDAC pour le camp minier d'Esker situé dans le Nord du Québec. Il y est ainsi proposé une analyse d'une solution optimale pour améliorer la situation énergétique du camp minier. Une amélioration de l'efficacité énergétique globale y est d'abord traitée pour, ensuite, chercher un système de production électrique optimal. À l'aide du logiciel présenté dans le chapitre 2, une analyse est réalisée entre différentes configurations de SHEDAC possibles.

En se basant sur différents critères techniques et énergétiques, une solution optimale est proposée avec une étude détaillée des résultats énergétiques obtenus.

Le chapitre 5 présente une étude finale intitulée « Élaboration de nouvelles stratégies d'opération du SHEDAC » et est le résultat de la sous-étape D de la méthodologie. Ce dernier chapitre est une contribution additionnelle qui s'appuie sur l'ensemble des sous-étapes précédentes. En effet, la mise en place de nouvelles stratégies tient compte de différents critères techniques et opérationnels qui peuvent être envisagés lors de l'utilisation d'un SHEDAC dans l'électrification du site isolé étudié. De même, le logiciel développé est mis à contribution afin d'implanter et simuler les stratégies proposées. Ainsi, afin de définir de nouveaux modes d'opération, une analyse des paramètres et contraintes du SHEDAC est établie. Trois stratégies sont, alors, mises en avant dans le but d'explorer les pistes d'optimisation possibles de l'efficacité du système. L'implantation et la simulation de ces stratégies sont, alors, réalisées et analysées afin de démontrer leurs bénéfices techniques et énergétiques.

Enfin, le chapitre 6 se présente comme une synthèse globale de tous les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire, en mettant en avant les principaux avantages pour les sites isolés obtenus grâce au SHEDAC, et son dimensionnement, ainsi que les améliorations qui y sont apportées. Une conclusion, ainsi, que des perspectives, telles qu'annoncées dans la sous-étape « E » de la méthodologie, sont finalement exposées.

CHAPITRE 2

SIMULATION TOOL FOR A HYBRID WIND-DIESEL SYSTEM WITH CAES

2.1 RESUME DE L'ARTICLE 1

Dans cet article, est présentée l'élaboration d'un logiciel destinée à la modélisation et l'analyse énergétique d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé. Plus précisément, cet outil doit permettre l'étude de l'efficacité énergétique (consommation de carburant, fréquences d'opération...) d'un tel système par rapport à des systèmes conventionnels comme l'usage de génératrices diesel seuls. Pour ce faire, ont été modélisés, et implantés dans la programmation du logiciel, les différents sous-systèmes qui composent un SHEDAC, à savoir : le système éolien, la génératrice diesel et le processus de suralimentation, et les sous-systèmes de stockage d'énergie (compresseur, réservoir). De plus, divers modes d'opération sont, également, implantés afin d'obtenir le fonctionnement escompté en fonction du cas d'étude.

Dans le but de valider la pertinence des résultats obtenus avec le logiciel, une comparaison avec un logiciel déjà existant et fiable, HOMER©, a été réalisée sur une étude de cas appliquée au camp minier d'Esker. Avec un écart de résultats inférieur à 10%, il a ainsi été prouvé que l'outil mis en place, est parfaitement pertinent pour l'analyse de systèmes hybrides en énergie.

Il y est présenté, ensuite, une étude de cas afin de proposer les résultats d'un système « idéal » pour l'étude de cas traitée dans l'article. Le système « idéal » est dimensionné en supposant qu'il n'y a aucune contrainte au niveau du système de stockage, c'est-à-dire qu'il n'y pas de pertes liées au processus de stockage et qu'il est possible de stocker de l'air indéfiniment. Ainsi, grâce à la configuration du SHEDAC établie, les résultats présentent une économie de carburant possible de 25,6 % (en basse pénétration éolienne) et de 47,9 % (en haute pénétration éolienne) par rapport à un système composé uniquement de génératrices. De tels résultats ont

permis d'attester de l'efficacité du SHEDAC en termes d'économie de carburant mais aussi au niveau de la réduction des fréquences d'opération des génératrices diesel.

Pour ces raisons, le logiciel ainsi que les résultats obtenus pour une étude de cas précise ont permis de valider l'efficacité d'un SHEDAC en site isolé, et de proposer un nouvel outil universel pour la réalisation d'une telle étude. Le deuxième article, présenté dans le chapitre suivant, permet alors de mettre à profit l'utilisation du logiciel développé ici, afin de réaliser une analyse des performances basée sur le paramétrage du système de stockage, et d'en déduire un exemple d'optimisation du SHEDAC.

Dans les sections qui suivent sera présenté l'article 1 tel que soumis au journal « Applied Energy ».

Simulation Tool for a Hybrid Wind-Diesel System with CAES

Nicolas Martinez^{1*}, Adrian Ilinca¹, Hussein Ibrahim^{2,*}, Youssef Bouchaabane¹

¹ Wind Energy Research Laboratory (WERL), Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Québec, Canada G5L 3A1, nicolas.martinez090@gmail.com, adrian_ilinca@uqar.ca, youssefbouchaabane.p@gmail.com

² TechnoCentre éolien, 70 rue Bolduc, Gaspé, Canada G4X 1G2, hbrahim@eolien.qc.ca

Abstract

In remote areas, difficult to access and not connected to the main electric grids, the electricity is commonly provided by diesel generators. They represent a continuous, stable and safe energy supply. However, for economic and environmental reasons, hybrid systems using renewable energies are increasingly used. The wind-diesel hybrid system with compressed air energy storage (WDCAS) is one of the available solutions both for new installations or upgrade of existing ones. In this project, we developed new software for the design and analysis of WDCAS. The software validation is done through a comparative study with an existing tool, Homer© (NREL) for operation as a simple wind-diesel system. The different operation modes of the hybrid wind-diesel system with CAES are then explored. Performance improvement and impact of hybridization on fuel consumption and GHG emissions are determined.

Keywords: remote areas, hybrid power generation, wind energy, wind-diesel hybrid system, compressed air energy storage, software tools

Nomenclature

Symbol/abbreviation	Signification	Symbol/abbreviation	Signification
α	wind shear coefficient	η_s	electric efficiency of the wind turbine
λ	stoichiometric air/fuel ratio	η_{i_DE}	indicated efficiency of the engine
η_{p_c}	polytropic efficiency of the compressor	ρ_a	air density
η_{tr}	transmission efficiency between the engine and the compressor	A	fuel consumption parameter
η_{v_DE}	volumetric efficiency of the engine	B	fuel consumption parameter
π_c	total compression ratio	c	scale parameter (Weibull distribution)

π_{i_C}	compression ratio for each stage	C_{P_WT}	power coefficient
E_{an_CH}	annual charge consumption	$E_{\bar{v}_w}$	wind turbine annual energy
$f(v_w) :$	Weibull density probability function	$h_{WT} :$	wind turbine hub height
$h_0 :$	reference height	$k :$	shape parameter (Weibull distribution)
$\dot{m}_c :$	compressed air mass flow (from the compressor)	$\dot{m}_{f_DE} :$	fuel mass flow injected in cylinders
$\dot{m}_{in_DE} :$	air mass flow entering the engine	$\dot{m}_u :$	capacity of a storage unit
$n_c :$	polytropic index	$N_c :$	stage number of the compressor
$N_{max_unit} :$	number of maximum storage units	$NB_{WT} :$	number of wind turbines
$ND_{auto} :$	number of days of autonomy	$p_a :$	inlet atmospheric pressure of the compressor
$p_{ou_C} :$	outlet pressure of the compressor	$p_{in_DE} :$	inlet pressure of diesel engine

$p_{st} :$	storage pressure	$P_{C_1} :$	single-stage compressor power
$P_C :$	multi-stage compressor power	$P_{CH} :$	load power
$P_{CH_{avs}} :$	average load	$P_{DE} :$	diesel engine power
$P_{EX_WT} :$	excess wind power	$P_{EM} :$	Minimal power required to start the compressor electric motor
$P_{EX_WT} :$	excess wind power	$P_{max_CH} :$	maximum load power
$P_{max_WT} :$	maximum wind turbine power	$P_{nDE} :$	nominal diesel engine power
$P_{WT}(v_w) :$	wind turbine power	$P_{WT_a}(v_w) :$	wind power
$PCI :$	indicated lower calorific value of the fuel	$R :$	perfect gas constant for the air
$S_{WT} :$	swept area	$t_{step} :$	time step
$t_{total} :$	duration of the simulation	$T_{st} :$	storage temperature

V_{st} :	total volume of the storage	v_w :	wind speed
v_{0_w} :	wind speed at reference height	WEPR :	wind energy penetration rate
WPPR :	wind power penetration rate		

1. State of the art of hybrid renewable systems and design software

Given the size of the territory and geographical diversity, Canada includes no less than 300 remote communities, representing more than 200,000 people. These communities are scattered throughout the country with a strong dominance in the provinces of Yukon, Nunavut, Northwest Territories and islands [1]. Although during the last fifteen years the number of these areas has decreased, the population and demand is increasing. This last element thus introduces the issue of electrification of isolated sites. The specificity of remote communities is the lack of connection to the main electricity and gas distribution networks. This is often due to geographical isolation and nature (mountains, islands ...) of these sites that prevent or make it too expensive to connect to the main energy network. These high costs are due to the installation of power lines over distances too large and the resulting losses during distribution [2]. Therefore, these communities need to produce locally their electricity; most of it comes from non-renewable sources such as diesel which is easy to transport over large distances. However, use of diesel generators raises economic, environmental and sustainability issues.

New energetic alternatives have been explored and numerous projects and studies have been conducted over the last decade [3-6]. Thus, the use of renewable energy becomes the undisputable solution for hybridization with diesel generators [7-8]. These systems are characterized by the use of a renewable energy to displace some of diesel generators using or not a storage system. A brief presentation of hybrid systems using wind, solar, hydro or biomass energy is done:

- *Wind energy*: The use of wind energy in addition to diesel generators is one of the first alternatives that has been considered because of local resource availability and relative ease of implementation. Given its variability the wind energy can't be used as the only energy supply in remote areas and hybrid system complexity increases significantly with wind penetration level [2], [7-10].
- *Solar energy*: The advantages and drawbacks of solar energy are similar to wind energy. The choice between solar and wind for hybridization is dictated by resource availability and cost of energy. Several projects explored solar-wind-diesel hybrid systems with or without storage [11-12].
- *Hydro power*: This renewable energy benefits of a mature technology but is not always available in most remote areas [10], [13-14].
- *Biomass*: If biomass is available locally in sufficient quantity, its use for heat or steam for electricity production can be cost effective. The power is easier to adapt to the charge compared with wind, solar and hydro. Therefore, electricity production from biomass can completely eliminate use of diesel generators [10], [15-16].

- *Storage:* The increasing share of renewable energy as a replacement of diesel requires the development of storage technologies adapted to the hybridization. Periodic renewable energy excess should be stored for later use, when renewable resource is not available. Numerous projects and studies of hybrid systems using different types of storage have been conducted [17-23]. A parametric analysis of nine storage technologies has been conducted to establish the most suitable for a hybrid wind-diesel system [2], [18]. Compressed air storage is the best solution in terms of cost, simplicity, lifetime, contribution to reducing fuel consumption and greenhouse gas emissions.

Among the various alternatives, the wind-diesel hybrid system with compressed air energy storage (WDCAS) has been considered and studied [24-25]. The characteristics of this system have been studied [1], [24-28] and will be presented in the next sections.

Before presenting the WDCAS software, a brief state of the art of existing design and analysis tools for hybrid energy systems is presented to justify its development and demonstrate its new features [29]. Most of the existing available software can be applied to the design and analysis of hybrid, wind and solar systems (photovoltaic and thermal) as presented in Table 1. Additional details about existing software are presented in Annex 1.

Table 2 : List of hybrid renewable design system software

Software	Country	Goals	Technologies of electric production	Technologies of energy storage
HOMER [30]	United States	Technical and economic sizing of hybrid networks with renewable energy	Photovoltaic, wind turbine, hydroelectric, diesel generator, biomass.	Electrochemical cells, flywheel, hydrogen storage.
RETScreen	Canada	Analysis (technical, economic and	Photovoltaic, wind	Thermal storage,

[31]		environmental) of clean energy projects	turbine, hydroelectric, diesel generator, gas turbine, marine energy, geothermal, biomass.	fuel cell.
JPElec [32]	France	Simulation and analysis of power grids in steady state	Photovoltaic, wind turbine, hydroelectric, diesel generator.	Electrochemical cells.
Hybrid 2 [33]	United States	Technical and economic sizing of hybrid networks with renewable energy	Photovoltaic, wind turbine, diesel generator.	Electrochemical cells.
HySim [29]	United States	Technical and economic analysis of remote rural off grid hybrid system	Photovoltaic, diesel generator.	Electrochemical cells
HySys [29]	Spain	Sizing and long-term analysis of off grid hybrid systems	Photovoltaic, wind turbine, diesel generator.	-
Hybrid Designer [34]	South Africa	Technical and economic sizing of hybrid systems with renewable energy	Photovoltaic, wind turbine, diesel generator.	Electrochemical cells
SOLSIM [34]	Germany	Technical and economic analysis of hybrid systems with renewable energy	Photovoltaic, wind turbine, diesel generator, biomass.	Electrochemical cells
TRNSYS [35]	United States	Simulate transient system behaviour	Photovoltaic, wind turbine, diesel generator.	Electrochemical cells

Therefore, multiple software solutions are available for the design and analysis of hybrid energy systems for any location in the world. However, they cannot encompass all available solutions and none of them can be used for hybrid systems with compressed air storage. The software to be

used to design such a system requires not only the additional modelling of the compressed air storage itself but also the modification of diesel engine characteristics to account for its overcharge with stored compress air. The WDCAS software presented in this paper completes existing tools for the design and analysis of wind-diesel hybrid systems with compressed-air storage [37].

2. Presentation of the WDCAS

The WDCAS stands as one of the best solutions for diesel hybridization with renewable energies as fuel consumption is reduced both by the use of renewable energy and by the optimization of diesel engine [19-20]. The cost, simplicity, lifespan, contribution to reducing fuel consumption and greenhouse gas (GHG) emissions are the advantages of this young technology that makes it appropriate for wind-diesel hybridization [18], [23] . The main components of a WDCAS are the initial energy source (diesel), renewable energy source (wind) and the compression and storage system (compressor and reservoir) [38]. Other subsystems must be added to ensure the management of energy flows and correct operation of the hybrid system as: expander, dumping loads, automatic control systems (Figure 1).

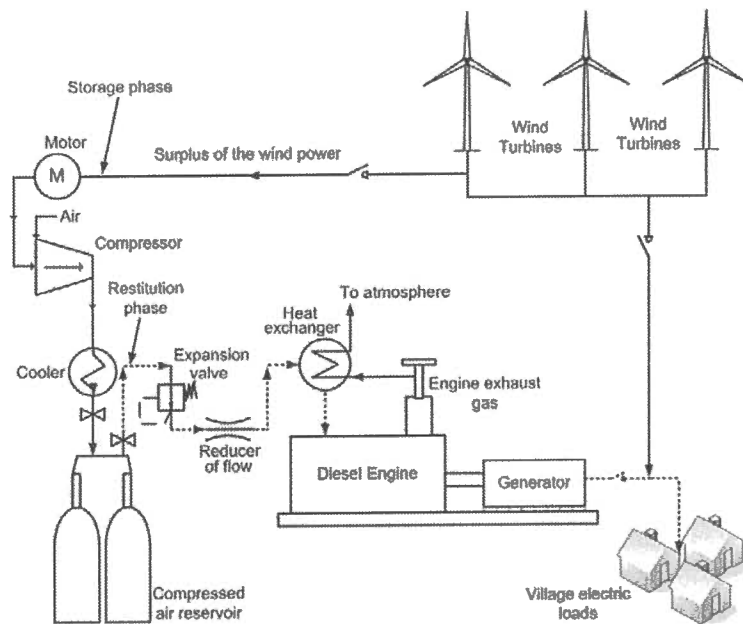


Figure 8 : Illustration of the WDCAS [2]

The principle of WDCAS operation is generally the same, although it may vary depending on the size of the installation and the wind power penetration rate. Diesel engines and wind turbines contribute to supply the load. If wind power is in excess (strong wind regimes), it is used to compress the air which is then stored in a tank that can be natural or superficial. During low winds, this air is injected into the engines that operate in different modes: supercharged, hybrid or pneumatic [28]. Regardless of the mode, the stored compressed air serves to improve engine performance and reduce fuel consumption.

The performances of a WDCAS system have been determined at specific regimes and implementation scenarios (high or low penetration, high or low storage, etc.) [17], [26], [39-40]. For each case, the sizing and calculations involved in the design and performance analysis of such a hybrid system have not integrated all possible scenarios that occur over a complete one year operation of the system with possible hourly transitions from one operating regime to another as it is the case for example with HOMER software. With the development of this

WDCAS software, we are following system operation over a complete one year period taking into account all parameters that will affect system performance.

3. System model and software data

WDCAS design and analysis is based on the physical modelling of its subsystems. The structure and characteristics of the software and the physical models used for each subsystem are presented in this section.

3.1 SOFTWARE'S STRUCTURE

The software's structure is shown in the following figures which represent the user interface (Figure 2), the data inputs (Figure 3) and the data outputs and the obtained results (Figure 4).

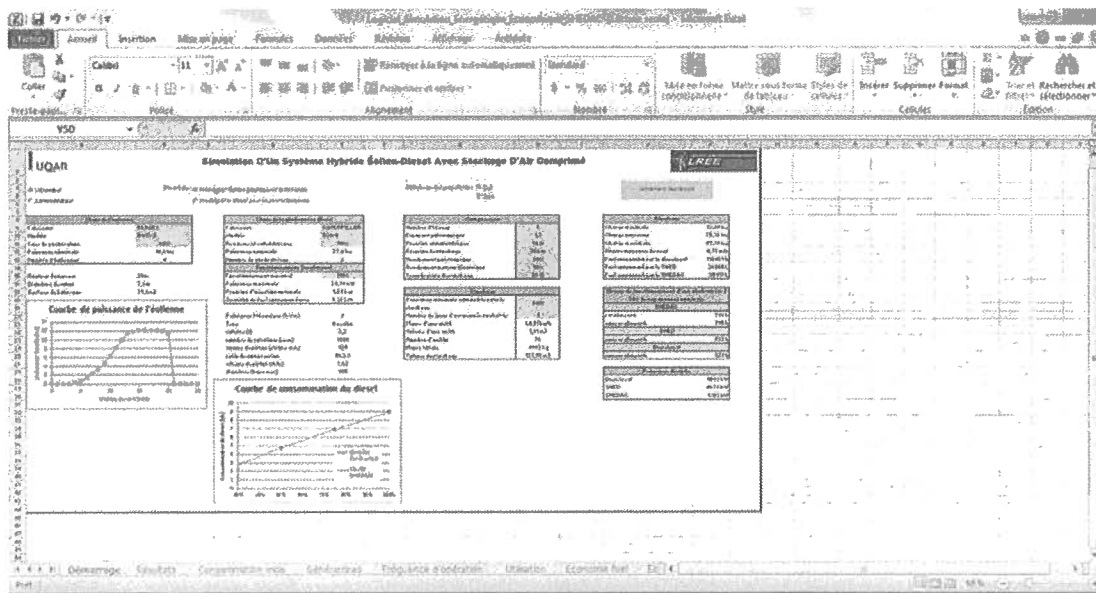


Figure 9 : User interface of the software

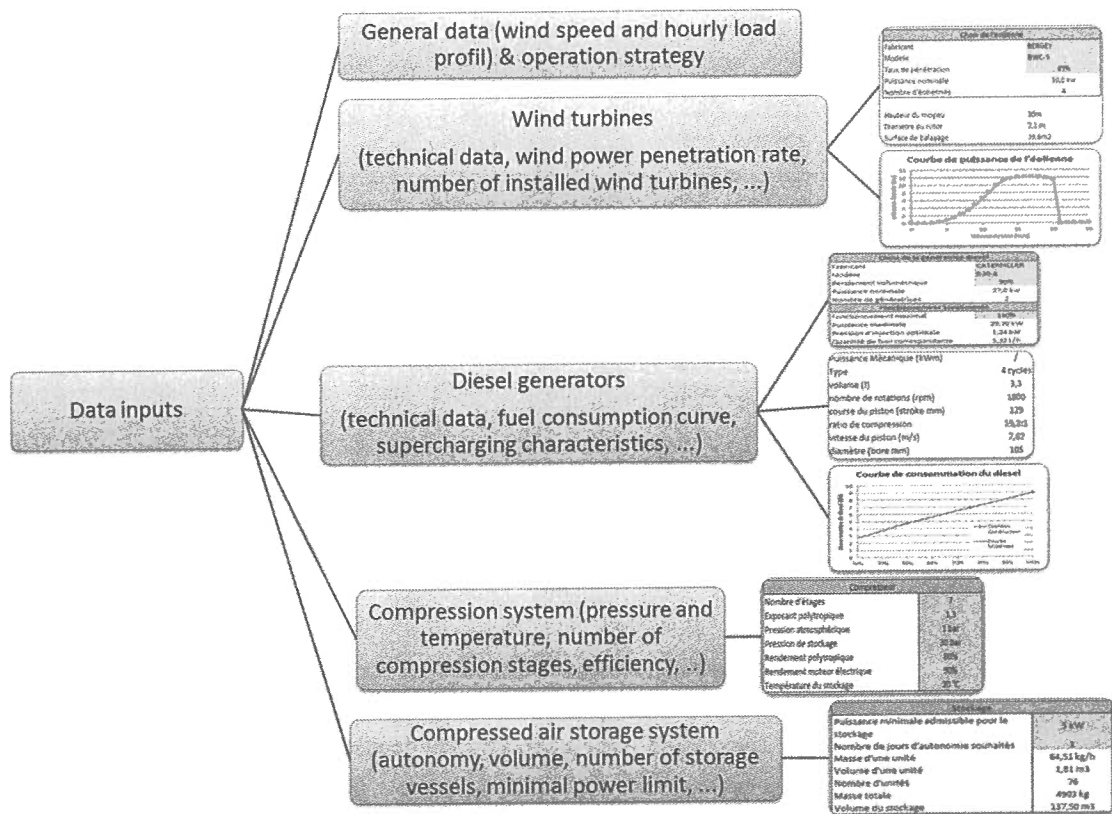


Figure 10 : Different data inputs of the software

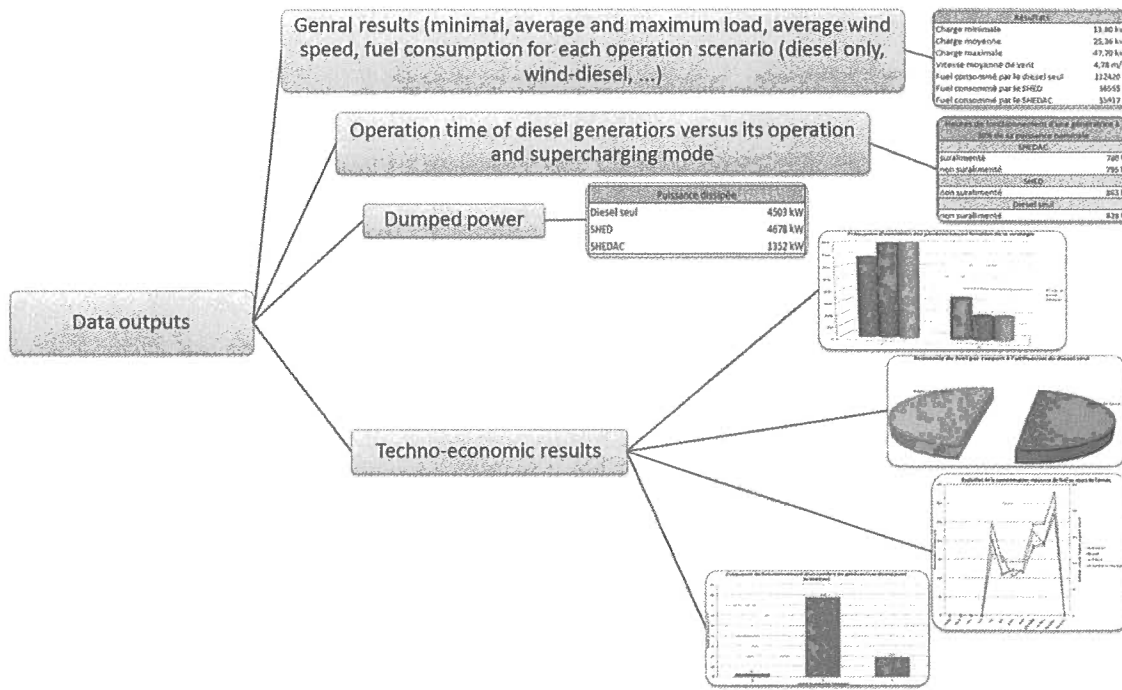


Figure 11 : Different data outputs of the software

3.2 BASIC PARAMETERS

3.2.1 SIMULATION TIME AND TIME STEP

The user can choose the duration of the analysis (t_{total}). By default, the duration is one year because that allows system simulation over a complete cycle of seasons, charge and weather conditions.

The user can choose the time step (t_{step}) for the simulation. By default, the time step is one hour because, in general, the hourly diesel consumption is known. This time step is also a standard for load and meteorological data.

3.2.2 ENERGY BALANCE AS BASIC EQUATION

The software uses the following energy balance equation at every time step over the complete simulation duration:

$$Load = Power_{wind\ turbine} + Power_{diesel\ generator} - Power_{compressed\ air\ storage} \quad (1)$$

For each time step, diesel generator power and/or the power used for compressed air storage are adjusted to estimated load and available wind power. If the step time is one hour so the system must respect this equation each hour. Function of the load, the wind resource and the storage level, the powers are calculated. In section IV we show that it is possible to prioritize a production system compared to other according to the “operation strategies”. Details about the parameters and physical models used to determine each term of equation (1) are presented here.

3.3 SUBSYSTEMS MODELLING

3.3.1 *LOAD*

The software does not use any specific model for the load; the user should provide this data according to each specific project. For example, if the time step is one hour, the user must introduce as data the hourly variation of the average load over the entire simulation period. If the site data is unknown, the user can use a typical load profile function [8]. According to load data, the software determines the maximum, minimum and average values required in the various calculations of subsystems models.

3.3.2 *WIND TURBINE POWER*

The wind turbine instantaneous power (energy if we consider it over one time step) is determined by the average wind speed at that particular moment (or time step) and the type of wind turbine. Therefore, the user needs to specify the wind speed characteristics of the site in the form of Weibull parameters or average wind speed. If only average wind speed is provided, the software will consider a Weibull distribution with a shape factor of 2 (Rayleigh distribution).

The wind turbine (WT) performance is characterized either by its power curve or the power coefficient, that combined with wind characteristics on the site will provide the annual energy production [9]. The WT power curve represents the variation of the power output with the wind

speed, $P_{WT}(v_w)$, and is provided by each manufacturer. The software uses a database with the power curves of most usual wind turbines. The user can also define and use a power curve for a new wind turbine.

The power coefficient is an alternate value to determine wind turbine power at each time step. It is defined as the ratio between WT power and total power available in the wind:

$$C_{P_WT} = \frac{P_{WT}(v_w)}{P_{WTa}(v_w)} = \frac{P_{WT}(v_w)}{\frac{1}{2} \rho_a S_{WT} v_w^3} \quad (2)$$

and its maximum value is the Betz limit.

Energy production over a given time period will consider both wind turbine power curve and wind speed distribution. As an example, the annual energy production is:

$$E_{\bar{v}_w} = 8760 \sum_{v_w=0}^{v_w=25} P_{WT}(v_w) * f(v_w) \quad (3)$$

with Weibull distribution defined as:

$$f(v_w) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

Weibull distribution represents the probability to have a certain wind speed. Its parameters, c (scale factor) and k (shape factor) are characteristics of the site and should be provided by the

user. If average wind speed is known at the site, then k is assumed equal to 2 ($k = 2$, Rayleigh distribution) and c is computed.

The wind speed (Weibull parameters) known at a height h_0 is adjusted at hub height using shear coefficient, α :

$$\frac{\bar{v}_w}{v_{0_w}} = \left(\frac{h_{WT}}{h_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

One of the main characteristics of a hybrid system is the wind power penetration rate defined as the ratio of installed wind power capacity to maximum load:

$$WPPR = \frac{P_{\max_WT}}{P_{\max_CH}} \quad (6)$$

Similarly, the wind energy penetration rate represents the share of wind energy in total energy over a given period of time, generally one year:

$$WEPR = \frac{E_{EW}}{E_{an_CH}} \quad (7)$$

These characteristics are important as different system topologies, operation strategies and economic parameters are specific to each low, medium or high penetration level of wind energy. In the software, the user should define the desired WPPR level of the system. According to this value, the software determines the number of wind turbines needed:

$$NB_{WT} = \frac{P_{\max_CH} * WPPR}{P_{WT}(v_w)} \quad (8)$$

Using all these data, the software will generate wind speed over the entire period of analysis and determine wind power at each time step.

3.3.3 DIESEL GENERATOR POWER

The WDCAS system allows the use of one or more diesel generators operating in “normal mode” (without compressed air for overcharging) and/or supercharged with compressed air. In this context, the computational models described in references [41-43] have been used. The user chooses how the diesel generator will work based on the operation strategies (see Section IV) and the software determines the required diesel power according to energy balance in equation (1).

For normal operation, fuel consumption is determined based on the diesel required power and its technical characteristics. Most common diesel generators are included in a data base that is addressed by the software. The user can add the characteristics of a “new” diesel generator. The software determines fuel consumption using the typical relation:

$$\dot{m}_{f_DE} = A \cdot P_{DE} - B \quad (9)$$

where A and B are technical parameters of the used diesel generator. The indicated efficiency is determined as:

$$\eta_{i_DE} = \frac{P_{DE}}{PCI \cdot \dot{m}_{f_DE}} \quad (10)$$

In supercharged mode, the stored compressed air is used such as to maintain an air/fuel ratio (λ) value resulting in optimal diesel efficiency. Air/fuel (λ) ratio is defined as:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{in_DE}}{\dot{m}_{f_DE}} \quad (11)$$

Previous studies [27], [39] have shown that maximum efficiency of the diesel engine ($\eta_{i_DE} \cong 56\%$) is reached for an air/fuel ratio of $\lambda \cong 53$. Therefore, the software will consider this optimal ratio for all overcharged operation regimes. The fuel rate and compressed air flow rate

required to supercharge the diesel engine are determined from the following equation, where we consider $\eta_{i_{DE}} = 56\%$ [44]:

$$P_{DE} = PCI * \eta_{i_{DE}} * \dot{m}_{f_{DE}} = PCI * \eta_{i_{DE}} * \frac{\dot{m}_{in_{DE}}}{\lambda} \quad (12)$$

3.3.4 COMPRESSED AIR STORAGE

The compressor type determines how is used the excess of wind energy over the charge resulting from equation (1) and the size of the storage tank. Subsystem modelling uses physical parameters related to air compression phenomena [37-39]. The software doesn't have predefined compressors and the user should configure them according to specific situation.

The relation between power and compression ratio of a single-stage polytropic compressor is defined by:

$$P_{C_1} = \frac{n_C}{n_C - 1} * \dot{m}_C * R * T_{st} * \left[\left(\frac{p_{out_C}}{p_a} \right)^{\frac{n_C - 1}{n_C}} - 1 \right] * \frac{1}{\eta_{p_C}} \quad (13)$$

The most convenient solution to increase the compression ratio is to combine several single-stage compressors or directly use a multi-stage compressor. We are considering identical compression ratio for each stage of the compressor, as follows:

$$\pi_{i_C} = \frac{p_1}{p_a} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \dots = \frac{p_{NC} (=p_{out_C})}{p_{NC-1}} \quad (14)$$

The resulting compression ratio for the whole compressor, defined as the ratio between the outlet and atmospheric pressure will be:

$$\pi_c = \frac{p_{out}}{p_a} = (\pi_{i_c})^{N_c} \quad (15)$$

We are considering that the outlet pressure is identical to the storage pressure and its value is provided as an input data by the user. The relation between the multi-stage compressor power and compressed air mass flow rate becomes:

$$P_c = \frac{n_c N_c}{n_c - 1} \cdot \dot{m}_c \cdot R \cdot T_{st} \cdot \left[\left(\frac{p_{out}}{p_a} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{p_c}} \quad (16)$$

In the meantime, this compressor power is equal to wind power surplus adjusted with electric motor and transmission efficiency:

$$P_c = P_{EX_WT} \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_s = (P_{WT} - P_{CH}) \cdot \eta_{tr} \cdot \eta_s \quad (17)$$

From equations (16) and (17) we determine the compressed air mass flow rate as a result of excess wind energy.

3.3.5 STORAGE TANK

The key parameter of this subsystem is the **storage unit** which represents the quantity of compressed air coming out from the tank that is required to supercharge the diesel engine such as to deliver a power equivalent to the average charge, during one time step (generally one hour). The assumption of an optimal supercharging of the diesel is made. Thus, the maximum efficiency of the diesel engine ($\eta_{i_{DE}} \cong 56\%$), reached for an air/fuel ratio of $\lambda \cong 53$ are used to determine the storage unit as follows:

$$\dot{m}_u = \frac{\lambda * P_{CH_ave}}{\eta_{i_DE} * PCI}$$

(18)

As the software was developed as a design tool, the user should provide the number of days of autonomy during which the system should provide energy without wind, by using only the supercharged diesel generator. As a result, the required number of storage units is:

$$N_{max_unit} = ND_{auto} * 24 * 3600 * \frac{t_{step}}{1\ Hour}$$

(19)

If the time step is one hour (which is usually the case), the last term in the equation is equal to unity. The volume of the storage tank will be:

$$V_{st} = \frac{N_{max_unit} * \dot{m}_u * R * T_{st}}{P_{st}}$$

(20)

3.4 DATA SUMMARY

The input data for the software are summarized in Table 2:

Table 3 : Input data

Data	Symbol
Time step and duration of the simulation	t_{step} and t_{total}

Charge profile	P_{CH}
Wind energy data	
Wind speed based on Weibull distribution data	v_w as a function of $f(v_w)$
Wind turbine power curve	$P_{WT}(v_w)$
Wind power penetration rate	$WPPR$
Diesel generator data	
Volumetric efficiency ¹	η_{VDE}
Fuel consumption parameters (equation 9) in normal operation mode according to diesel model	A and B
Compressor data	
Number of stages	N_c
Polytropic index	n_c
Atmospheric pressure	p_a
Storage pressure	p_{st}
Storage temperature	T_{st}
Polytropic efficiency	η_{p_c}
Transmission efficiency	η_{tr}
Compressor electric motor efficiency	η_e
Minimal power required to start the electric motor of the compressor	P_{EM}

¹ The volumetric efficiency is only considered in normal operation of the diesel generator. In supercharged mode, the operation of the generator is based on the maximum efficiency of the diesel engine.

Storage data	
Number of days of autonomy	ND_{auto}

4. Operation modes

4.1 General operation modes

Based on specific conditions, different operating scenarios of the hybrid system can occur. Although the main objective is to simulate the operation of a wind-diesel system with compressed air storage, for validation and performance comparison, the software can simulate the system only with diesel generators or a wind-diesel system without storage. Three operation modes are considered: diesel only (D), wind-diesel without storage (WD) and wind-diesel with compressed air storage (WDCAS). Therefore it is possible to determine the fuel economy according to wind power penetration and use of compressed air storage. In addition, each scenario was designed considering that diesel generators should not work (if possible) at less than 30% of their rated power, a limit under which diesel operation is questionable [45]. Moreover, when the system operates with a scenario using the wind turbine, the use of the renewable energy is privileged. More exactly, the share of wind energy is taken regardless of the power drawn by the charge. Thus, if the wind power is less than the charge, the diesel generators are used to fill the gap.

According to each operating scenario, the software determines the required number of diesel generators to operate. If the system operates only with generators, this number is calculated as follow:

$$NB_{DE} = \left\lceil \frac{P_{CH}}{P_{nDE}} \right\rceil + 1$$

(21)

If the system operates with generators and wind turbines, this number is calculated as follow:

$$NB_{DE} = \left\lceil \frac{P_{CH} - P_{WT}}{P_{nDE}} \right\rceil + 1 \quad (22)$$

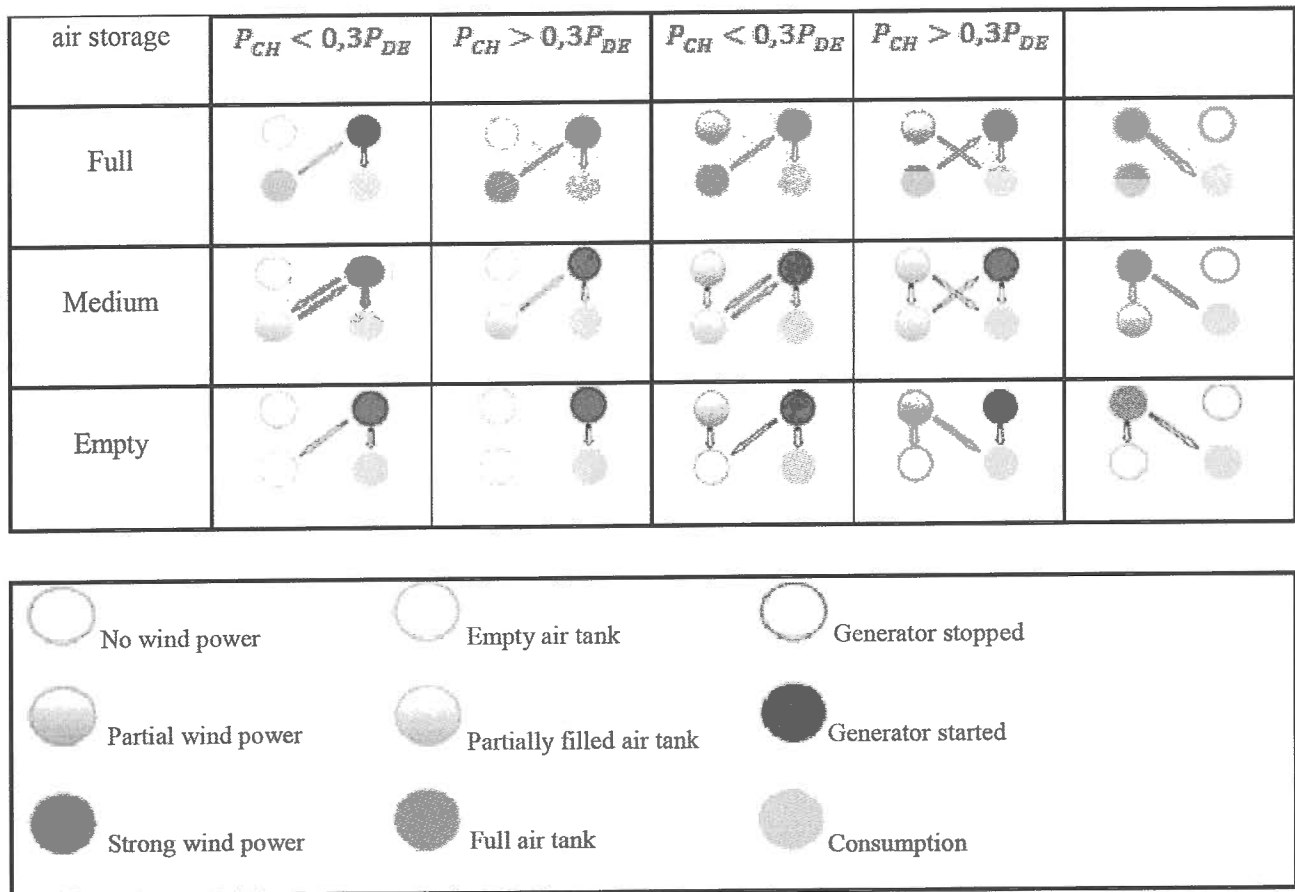
4.2 WDCAS operation modes

For this mode, operation is similar to wind-diesel hybrid system, but with the addition of compressed air storage and supercharging of diesel generators. These parameters are used as follows: when an excess energy is present (wind energy or generator energy), this energy is used to store compressed air, provided that the tank is not full. In terms of the supercharging, it is performed when the engines operate and the stored compressed air is sufficient. The software makes a comparison between the required units and units available to ensure proper management of the stored energy and the reserve of compressed air. According to available wind energy and charge power, the software adjusts the available power to compressed air in order to respect the equation (1).

The decision algorithm for the SHEDAC as used in the software is illustrated in Table 3. It is based on the status of subsystems, namely the available wind turbine power and the level of compressed air.

Table 4 : Decision algorithm of WDCAS

Compressed	$P_{WT} = 0$	$P_{WT} < P_{CH}$	$P_{WT} > P_{CH}$
------------	--------------	-------------------	-------------------



5. Software validation using wind-diesel operation mode

Based on case study data and operation mode, the software will determine the frequency of use and operation time of different production units, the amount of fuel consumed and energy dissipation when operating without storage. Therefore the results according to energy producing system, i.e. diesel generator only, wind-diesel hybrid or wind-diesel hybrid with compressed air storage can be easily compared. There is no software available that addresses the use of compressed air storage or available results in literature for complete WDCAS system operation. Accordingly, the validation of the software and its models is done using wind-diesel mode without storage. The results are compared with those of HOMER software which is the most suitable tool for this validation.

5.1 COMPARISON WITH THE HOMER SOFTWARE

Currently, HOMER software is one of the commonly used tools for the design and optimization of hybrid systems in isolated grids. Indeed, using large databases and calculations, it can perform simulations of systems including generators (with fossil or renewable fuels), wind turbines, photovoltaic panels, small hydropower plants or even storage units. Therefore, comparison of the WDCAS software with HOMER is relevant as long as no compressed air storage is considered. Indeed, HOMER software does not model compressed air storage or its use for diesel overcharging. For this reason, the comparison has been conducted for a wind-diesel hybrid system without storage.

5.2 CASE STUDY FOR VALIDATION

Charge and wind data measured at a mining camp in Canada has been used to perform the comparison between the WDCAS and HOMER software. The site, operated by a railway company is located in the province of Newfoundland in a completely remote area not connected to the electric grid. The monthly average load on the site [23] is illustrated in Figure 5.

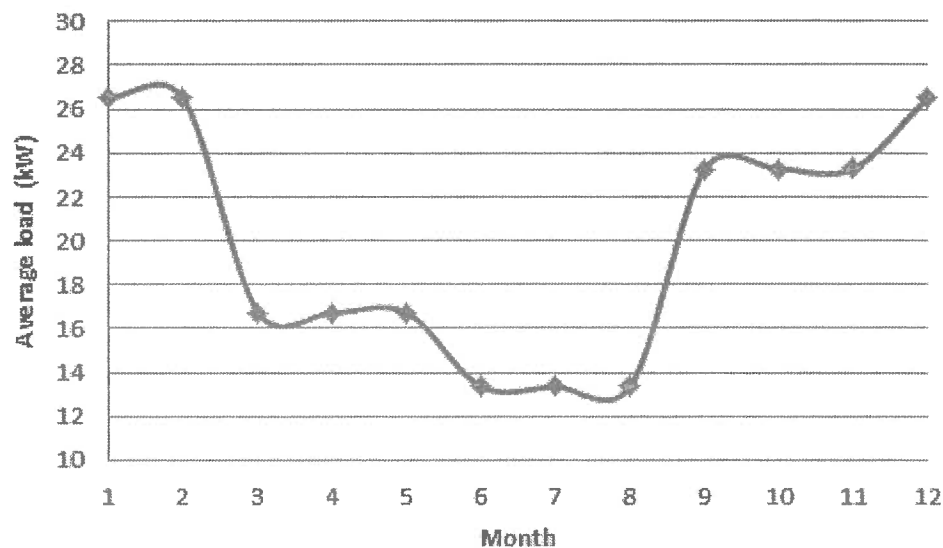


Figure 12 : Annual consumption load profile

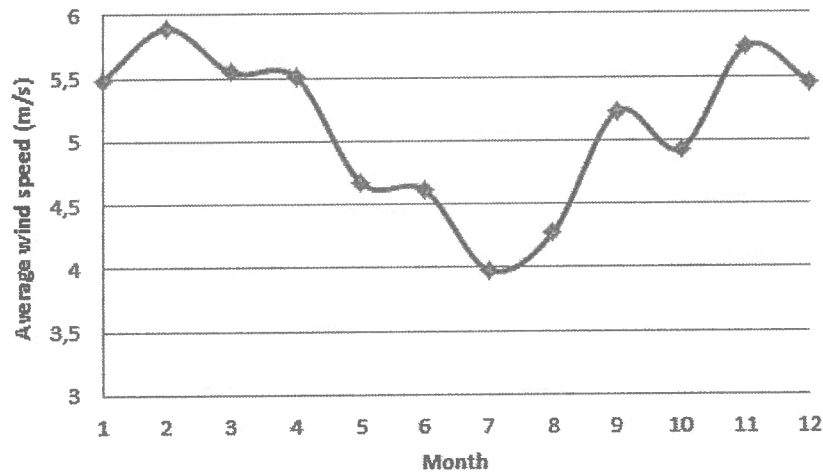


Figure 13 : Monthly average wind speed profile

The annual average load is 19.9kW, the maximum load is 50kW and the minimum load is 7kW. These values determine the wind-diesel system configuration used for comparison. Monthly average wind speed data at 10m height, available from Environment Canada [46] in a neighbouring site, are illustrated in Figure 6. The annual average wind speed is 5.1m/s. As wind speed probability distribution values are unknown, we consider that they follow a Weibull function with the shape parameter of 2 (Rayleigh distribution).

5.3 WIND-DIESEL SYSTEM CONFIGURATION

According to load values and wind speed data, the wind-diesel system will use:

- 5 identical D13-2 Caterpillar 12 kW diesel generators (available in HOMER and WDCAS databases);
- Wind turbine model: BWC Excel S-10 kW from Bergey. Two different wind power penetration rates (WPPR) levels are considered in the simulation. A low power

penetration configuration (40%) uses 2 wind turbines and a high penetration rate (80%) configuration uses 4 wind turbines.

The Table 4 is a summary of the data used in the simulation.

Table 5 : Data of the simulation study

	Data	Information
Annual load	Avg : 19,9 kW ; Max : 50 kW ; Min : 7 Kw	
Annual wind resource	Wind speed average : 5,1 m/s	
Diesel generator	Power : 5 x 12 kW	D13-2 Caterpillar
Wind turbine (low/high WPPR)	Power : 2 x 10 kW or 4 x 10kW	BWC Excel-S Bergey

5.4 SIMULATION RESULTS AND CONCLUSIONS ABOUT THE VALIDATION OF WDCAS SOFTWARE

The simulations were performed on HOMER and WDCAS software using same data. As each software provides its own specific results, the comparison was made only on common results, relevant to the validation parameters of WDCAS software. Moreover, the simulations were performed for low and high WPPR. These parameters are:

- The diesel fuel consumption,
- The electrical production of generators,
- The operation frequency of each generator,
- The electrical production of wind turbines,

- The share of wind energy in total production.

The results are summarized in the following Tables 5 and 6.

In view of these data, is noticed that the results for each software are very close, thus illustrating the accuracy and precision of WDCAS software. In fact, Table 5 shows less than 10 % difference between each result for a low penetration of wind power and less than 21% difference between each result for a high penetration of wind power. These differences are explained by slight differences in operation strategies used by the two software. It is likely that HOMER's operation strategies are not exactly similar to those used in the WDCAS software. As an example, to our knowledge, HOMER does not use the minimum operation limit of diesel generators set at 30 % of their nominal power. However, observing the share of wind energy in total production, we can conclude that these strategies are fundamentally similar. The WPPR is an important parameter in the system design as a higher WPPR results in over 5000L fuel reduction. Table 6 confirms these observations as, despite the slight difference in the results, the operation frequency of the generator is consistent in the two software.

Table 6: Comparative results between HOMER and WDCAS software according to WPPR

	Low penetration (WPPR : 40%)			High penetration (WPPR : 80%)		
	WDCAS	HOMER	Difference	WDCAS	HOMER	Difference
Diesel consumption (L)	56 321	57 662	2,32%	47 774	51 212	6,71%
Generators production	152 204	154 264	1,33%	128 879	136 552	5,62%

(kWh)						
Wind turbines production (kWh)	22 263	20 423	8,26%	51 315	40 846	20,40%
Wind Energy Penetration Rate	12,80%	12%	0,80%	28,47%	21,7%	6,77%

Table 7: Comparative of operation percentage for each generator between WDCAS and HOMER for each WPPR

		Low penetration (WPPR : 40%)			High penetration (WPPR : 80%)		
		WDCAS	HOMER	Difference	WDCAS	HOMER	Difference
% of generator operation	Generator 1	44,90%	46,75%	1,85%	41,70%	49,80%	8,1%
	Generator 2	32,82%	36,07%	3,25%	40,66%	34,79%	5,87%
	Generator 3	18,50%	13,70%	4,8%	14,59%	12,38%	2,21%
	Generator 4	3,43%	2,97%	0,46%	2,82%	2,62%	0,2%
	Generator 5	0,36%	0,52%	0,16%	0,22%	0,42%	0,2%

In view of simulation results, the WDCAS software is a reliable and effective tool for the analysis, design and optimization of wind-diesel hybrid systems. Although the system is validated only for wind-diesel without storage operation, it is assumed that similar accuracy is obtained with compressed air storage. A case study with the compressed air storage and a performance analysis is presented in the next section.

6. Performance analysis of WDCAS

In this section, the WDCAS software is used to assess the performance of a hybrid wind-diesel system with compressed air storage. The data from the previous case study (Esker Camp) are used to determine WDCAS performance improvement due to compressed air storage. The analysis is based on “ideal” conditions as explained in the next section and has been performed again for two WPPR, i.e. low penetration (40%) and high penetration (80%).

6.1 DETERMINATION OF IDEAL CONDITIONS

“Ideal” conditions allow an infinite storage in the sense that there are no volumetric and energetic constraints related to the storage of compressed air and its use. Thus, to be considered ideal, the operation scenario is based on the following assumptions:

- The volume of the tank is “infinite”. Tank size is such that the system can store excess energy at all times. Storage system parameters, i.e. storage pressure and autonomy are chosen accordingly.
- The minimum allowable power for storage is zero. That means that any excess power is used for storage or, in other words, the power dissipated by the system is zero.
- The compressor is ideal in the sense that there is no power loss (motor/compressor efficiency is 100%) and there is no mechanical loss (polytropic efficiency is 100%).
- The number of compressor stages must be the highest possible to improve the compression performance.
- The compression is done under the following conditions: pressure of the outdoor air (1 bar), storage temperature (20 ° C) and the polytropic exponent of air ($n = 1.3$).

Based on these assumptions, the ideal scenario used for this study is presented in the Table 7.

Figures 7 and 8 present the results of the WDCAS software simulation for the ideal conditions:

Data	Value
Number of compressor stages	7
Polytropic exponent	1,3
Atmospheric pressure	1 bar
Storage temperature	20°C
Polytropic efficiency	100%
Compressor motor efficiency	100%
Minimum allowable power for storage	0 kW
Storage pressure	2 bars
Number of days of autonomy	1000 (infinite tank volume)

Table 8: Characteristics of the ideal reference scenario

Results	
Minimal load	7,00 kw
Average load	19,92 kw
Maximal load	50,00 kw
Average wind speed	5,10 m/s
Only diesel consumption	66614 L
WDS diesel consumption	56321 L
WDCAS diesel consumption	49525 L

Generator operating hours at 30% of his nominal power	
WDCAS	
supercharged	143 h
no supercharged	2079 h
WDS	
no supercharged	3035 h
Diesel only	
no supercharged	3555 h

Dissipated power	
Diesel only	5728 kW
WDS	5877 kW
WDCAS	0 kW

Results	
Minimal load	7,00 kw
Average load	19,92 kw
Maximal load	50,00 kw
Average wind speed	5,10 m/s
Only diesel consumption	66614 L
WDS diesel consumption	47774 L
WDCAS diesel consumption	34695 L

Generator operating hours at 30% of his nominal power	
WDCAS	
supercharged	398 h
no supercharged	1142 h
WDS	
no supercharged	2780 h
Diesel only	
no supercharged	3555 h

Dissipated power	
Diesel only	5728 kW
WDS	10692 kW
WDCAS	0 kW

Figure 14 : WDACS software results for the ideal conditions at different WPPR: low penetration (40% - left table) and high penetration (80% - right table)

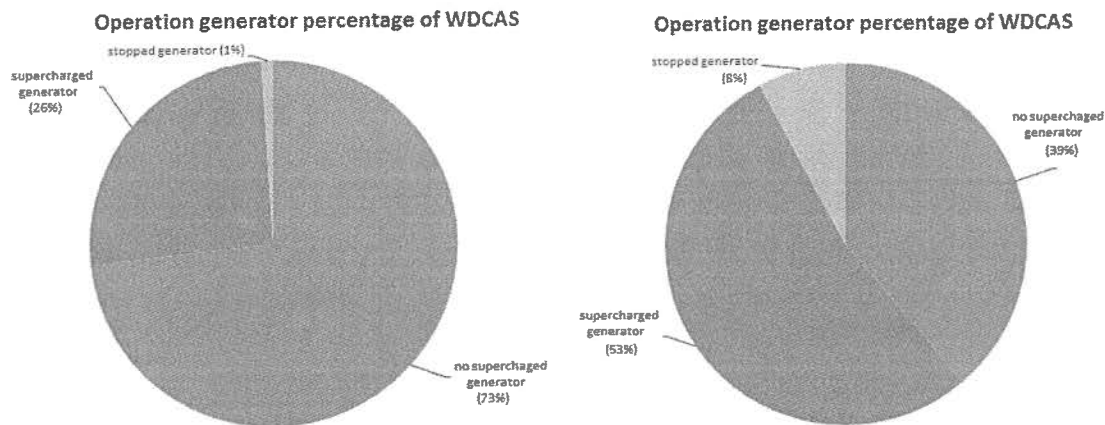


Figure 15 : Influence of WPPR on the operation of the diesel generator: low penetration (left) and high penetration (right)

Results analysis (Figure 7) indicates that WDCAS, with a low WPPR (40%), requires 49525 L of fuel, a saving of 12% compared to the wind-diesel system (56321 L) and 25.6% compared to diesel only mode (66,614 L). Moreover, with a higher WPPR (80%), an additional 14830 L of fuel is saved. The results in Figure 8 show that the operation of the system involves the use of generators in supercharged mode for 26% of the time against 73% in normal use (1% they are completely stopped) with a low penetration. For high penetration, generators operate in supercharged mode for 53% of the time against 39% in normal use (8% they are completely stopped). Fuel savings of approximately 27% with a low WPPR and 61% with a high WPPR are achieved when compared to diesel only operation. The choice of a higher WPPR improves fuel economy and efficiency of the WDCAS as for the higher WPPR (80%) the diesels operate in supercharging mode for more than half of the time.

Finally, no power is dissipated for the operation under ideal conditions; any surplus power is used to store compressed air when available.

7. Conclusion

A new software for the design and analysis of a hybrid wind-diesel system with compressed air storage (WDCAS) has been presented. The physical models for each subsystem have been developed as well as the operating strategies and hypothesis. A comparative study with HOMER software, a tool already recognized for sizing hybrid systems has been used for the validation of physical and numerical models. The comparison demonstrated the accuracy of the calculations performed by the new WDCAS software. This validation confirmed that the software can be used to model a wind-diesel hybrid system and has been extended to include compressed air storage (CAS). With this tool, a WDCAS performance analysis has been made to determine diesel fuel economy associated with the use of “ideal” compressed air storage at two levels of wind power penetration rate. With an 80% wind power penetration level, the use of CAS resulted in almost 50% reduction in diesel fuel consumption. Additional work is carried out to establish new operation strategies but also economic and environmental modules (greenhouse gas emissions) to provide a comprehensive tool for technical, economic and environmental analysis of WDCAS systems.

References

- [1] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Ramdenec D, Dimitrova M, Perron J, Adegnon M, Boulay D, Arbez C. Potential of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed air system for Nordic remote canadian areas. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):795-804.
- [2] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. *Rapport Technique*, Université du Québec à Rimouski, 2008.
- [3] Chauhan A, Saini RP. A review on Integrated Renewable Energy System based powergeneration for stand-alone applications: Configurations, storage, options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 38(2014):99-120.

- [4] Abdelkafi A, Krichen L. Energy management optimization of a hybrid power production unit. *Electrical Power and Energy Systems* 2014; 62(2014):1-9.
- [5] Zhou W, Lou C, Li Z, Lu L, Yang H. Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems. *Applied Energy* 2010; 87(2010):380-389.
- [6] Luo Y, Shi L, Tu G. Optimal sizing and control strategy of isolated grid with wind power and energy storage. *Energy Conversion and Management* 2014; 80(2014):407-415.
- [7] Ibrahim H, Ghandour M, Dimitrova M, Ilinca A, Perron J. Integration of wind energy into electricity systems: technical challenges and actual solutions. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):815-824.
- [8] Weis TM, Ilinca A. Assessing the potential for wind power incentive for remote villages in Canada. *Energy Policy* 2010; 38(2010):5504-5511.
- [9] LeGourieres D. *Les éoliennes: Théorie, conception et calcul pratique*. Editions du Moulin Cadiou 2008.
- [10] YekiniSuberu M, MohdWazir M, Bashir N. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 35(2014):527-539.
- [11] Kaabeche A, Ibtouen R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/ battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy* 2014; 103(2014):171-182.
- [12] Ma T, Yang H, Lu L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island. *Applied Energy* 2014; 121(2014):149-158.
- [13] Dursun B, Gokcol C. The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy* 2011; 36(2011):1227-1235.
- [14] Belanger C, Gagnon L. Adding wind energy to hydropower. *Energy Policy* 2002; 30(2012):1279-1284.
- [15] Evans A, Strezov V, Evans T. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14(2010):1419-1427.
- [16] Amigun B, Von Blottnitz H. Capital cost prediction for biogas installations in Africa: Lang factor approach. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 2009; 28(2009)134-142.
- [17] Ibrahim H, Ilinca A. Contribution of the compressed air energy storage in the reduction of GHG-case study: Application on the remote area power supply system. *InTechOpen*, Published on: August 22, 2012.

- [18] Ibrahim H, Ilinca A. Techno-Economic analysis of different energy storage technologies. InTechOpen, Published on: January 23, 2013.
- [19] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance index. Electrical Power Conference, EPC 2007, IEEE Canada, pages: 393 – 398, 25-26 Oct. 2007.
- [20] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems - characteristics and comparisons. Renewable and sustainable energy reviews 2008; 12(2008):1221-1250.
- [21] Bridier L, David M, Lauret P. Optimal design of a storage system coupled with intermittent. Renewable Energy 2014; 67(2014):2-9.
- [22] YekiniSuberu M, MohdWazir M, Nouruddeen B. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 35(2014):499-514.
- [23] Weis TM, Ilinca A. The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada. Renewable energy 2008; 33(7):1544-57
- [24] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Perron J. Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé. Revue des énergies renouvelables 2007; (2007):47-50
- [25] Ibrahim H, Ilinca A, Younes R, Perron J, Basbous T. Study of a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. Electrical Power Conference, EPC 2007, IEEE Canada, pages: 320 – 325, 25-26 Oct. 2007.
- [26] Ibrahim H, Dimitrova M, Ilinca A, Perron J. Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunications isolée. EJEE 2009; 12(2009):701-731.
- [27] Ibrahim H, Younes R, Basbous T, Ilinca A, Dimitrova M. Optimization of diesel engine performance for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. Energy 2011; 36(2011):3079-3091.
- [28] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for wind-diesel energy generation. Energy 2012; 38(2012):264-275.
- [29] Sinha S, Chandel SS. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014; 32(2014):192-205.

- [30] Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/groupe électrogène avec le logiciel HOMER. <http://www.solarpedia.fr>.
- [31] RetScreen - Introduction à l'analyse de projets d'énergies propres. RNCAN. <http://www.retscreen.net/fr/home.php>
- [32] JPelec - Manuel d'utilisateur. Supélec. <http://www.supelec.fr/>
- [33] Hybrid 2 - The hybrid power system simulation model. RERL. <http://www.ccere.org/rerl/projects/software/hybrid2/>
- [34] Schaffrin C, Knoblich I, Seeling-Hochmuth GC, VanKuik E. Solsim and hybrid designer: self optimizing software tools for simulation of solar hybrid applications. EuroSun 98 1998; V.2.17-1.
- [35] TRNSYS - Transient system simulation tool. <http://www.trnsys.com/>
- [36] HySys. AspenTech. <http://www.aspentech.com/products/aspen-hsys.aspx>
- [37] Thierbaut G, Wieser P, Ilinca A, Ibrahim H. Réalisation d'un logiciel de simulation de système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [38] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Dimitrova M, Perron J. Study and design of a hybrid wind-diesel-compressed air energy storage system for remote areas. Applied Energy 2010; 87(2010)1749-1762.
- [39] Ibrahim H., El-Hajj M., Ilinca A., Younès R., Dimitrova M., Arbez C., Boulay D., Adegnon M. Electricity Production in Nordic Village with a Wind-Diesel-Compressed Air Energy Storage System, 9th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition: Large Scale Integration of Wind farms, 15-17 June, Istanbul, Turkey, 2010.
- [40] Deck-Leger ZL. Contrôle d'un système de couplage éolien-diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [41] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Moteur diesel suralimenté, bases et calculs, cycle réel, théorique et thermodynamique. Rapport Technique, Université du Québec à Rimouski; 2006.
- [42] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. A new hybrid pneumatic combustion engine to improve fuel consumption of wind-Diesel power system for non-interconnected areas. Applied Energy 2012; 96(2012):459-476.
- [43] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Required time response of a variable valve actuator equipping a hybrid pneumatic - combustion engine. International journal of engine research 2012; 5(2012):514-528.

- [44] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Fuel consumption evaluation of an optimized new hybrid pneumatic-combustion vehicle engine on several driving cycles. *International journal of engine research* 2012.
- [45] Forcione A. Système jumelé éolien-diesel aux Îles-de-la-Madeleine (Cap-aux-Meules) - Etablissement de la VAN optimale. Hydro Québec; 2004.
- [46] Environnement Canada. <https://www.ec.gc.ca/>

Annex 1

- HOMER: Developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in USA, the Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), is the most used to design hybrid systems. This tool is suitable for carrying out quick prefeasibility, optimization and sensitivity analysis for different hybrid systems. HOMER uses multiple inputs and outputs to evaluate various configurations [30].
- RETScreen: Developed by the Ministry of Natural Resources of Canada, this software is a good feasibility study tool for both economic and environmental analysis of clean energy projects. Thanks to a large climate database, the user can simulate a project in any place in the world [31].
- JPElec: Developed by the Solar Energy National Institute in France, the JPElec software is a tool dedicated to the simulation and analysis of power grids in steady state. It uses various energy sources to create and simulate different hybrid systems [32].
- Hybrid 2: Developed by the Renewable Energy Research Laboratory (RERL) in USA, this software can perform detailed long term performance, economic analysis and predict the

performance of various hybrid systems. It uses statistical methods to complete its simulations [33].

- Hysim: Developed by the Sandia National Laboratory in USA, Hysim is among the first hybrid energy simulation models (1987). It is used to analyse remote rural off grid hybrid system with different renewable sources. This tool presents an interesting financial analysis [29].
- HySys: Developed by several technology groups in Spain, this software is used for sizing and long-term analysis of off grid hybrid systems with different renewable energy like photovoltaic panels or wind turbines [36].
- Hybrid Designer: Developed by the Energy and Development Research Centre (EDRC) in South Africa, this tool is especially used for off grid applications in Africa's weather condition. Using different sources, it produces a complete financial solution [34].
- SOLSIM: Developed by the Fachhochschule Konstanz in Germany, this software is a technically sophisticated and flexible tool to simulate hybrid system. It considers several energy sources and proposes technical and economic analysis with a time interval chosen by the user [34].
- TRNSYS: Developed by the Universities of Wisconsin and Colorado in USA, this tool was initially developed for thermal systems simulation but now it includes additional energy sources (thermal and electrical). It's an advanced software that provides technical and financial analysis for a large panel of technology solutions using renewable energies [35].

CHAPITRE 3

INFLUENCE OF COMPRESSED AIR STORAGE PARAMETERS ON WIND-DIESEL SYSTEM PERFORMANCE

3.1 RESUME DE L'ARTICLE 2

Dans cet article, une analyse de performance du SHEDAC est proposée afin d'étudier l'influence des paramètres de stockage sur l'efficacité générale du système. Une optimisation technique du SHEDAC est, ensuite, réalisée en tenant compte des conclusions de cette analyse. Il s'agit, ainsi, de démontrer à quel point le stockage peut jouer un rôle important dans le rendement du système. Pour ce faire, le logiciel précédemment développé est mis à profit. De plus, l'étude de cas qui est utilisée ici est la même que celle présentée dans l'article précédent.

En tenant compte du modèle physique utilisé pour le stockage, il serait, alors, possible de définir les différents paramètres caractéristiques. Parmi eux, ceux dont la variabilité dépend directement du choix du développeur sont, alors, choisis pour réaliser l'analyse de performance. Ces paramètres sont : le nombre d'étages de compression, le rendement polytropique, le rendement du moteur diesel, la pression de stockage et la puissance minimale requise pour le stockage. Leur influence sur la consommation de diesel est alors observée. Également, chaque calcul est réalisé pour deux niveaux de taux de pénétration éolien (40% et 80%). En effet, l'article précédent a révélé l'influence de ce paramètre lors de l'analyse de performance d'un tel système. Les résultats révèlent alors que, pour chaque paramètre, il y a une influence significative sur la consommation de carburant et donc, sur l'efficacité du système. De plus, il peut être remarqué que, dans la majorité des cas, il y a une valeur critique à partir de laquelle la variation du paramètre a une influence beaucoup moins prononcée sur la consommation de diesel. De tels résultats sont très significatifs dans l'optique d'une optimisation du système.

Une optimisation du SHEDAC est ensuite étudiée, en se basant sur le paramétrage du système stockage. Des critères d'optimisation sont alors définis dans le but de considérer tous les aspects qui rentrent en jeu dans le dimensionnement d'un système, à savoir : les contraintes techniques, les impacts économiques et les impacts logistiques. Ainsi, les résultats des simulations démontrent que le SHEDAC permet une économie de carburant de 15,5% (en basse pénétration éolienne) et de 30% (en haute pénétration éolienne) par rapport à un système composé uniquement de génératrices diesel. Il est possible de remarquer que ces résultats sont inférieurs à ceux présentés dans l'article 1. Néanmoins, dans l'article précédent, il s'agissait de résultats pour un système « idéal » (aucune contrainte et aucune perte énergétique), contrairement à ici où le système est considéré optimal, en tenant compte des contraintes et des pertes réelles. Enfin, l'étude des fréquences d'opération des génératrices met en évidence la capacité de ce système à réduire significativement le temps d'opération des génératrices.

Au regard des résultats obtenus à travers cet article, il peut être conclu que l'implantation du SHEDAC en site isolé est bénéfique et qu'il est possible d'optimiser ce système en considérant les différentes contraintes mises en jeu dans son fonctionnement. Plus particulièrement, il a été prouvé que l'influence du dimensionnement du stockage se présente comme tout aussi importante que celle des systèmes de production (éolienne et génératrice diesel). Le troisième article, présenté dans le chapitre suivant, permet alors, d'approfondir ces conclusions, afin de réaliser une étude beaucoup plus précise pour répondre à la problématique énergétique du camp Esker.

Dans les sections qui suivent sera présenté l'article 2 tel que soumis au journal «Energy ».

Influence of Compressed Air Energy Storage Parameters on Wind-Diesel System Performance

Nicolas MARTINEZ¹, Adrian ILINCA¹, Hussein IBRAHIM², Youssef BENCHAABANE¹, Drishtysingh RAMDENE³, Daniel R. ROUSSE⁴, Ambrish CHANDRA⁴

¹Wind Energy Research Laboratory (WERL), Université du Québec à Rimouski, G5L 3A1, QC, Canada

²TechnoCentre éolien, Gaspé, G4X1G2, QC, Canada

³ Institut Technologique de Maintenance Industrielle (ITMI), Sept-Îles, G4R 5B7, QC, Canada

⁴ t3e Industrial Research Chair, École de Technologie Supérieure, Montréal, H3C 1K3, QC, Canada

NOMENCLATURE

- λ : stoichiometric air/fuel ratio
- η_E : electric efficiency of the wind turbine
- η_{I_DE} : indicated efficiency of the engine
- η_{p_C} : polytropic efficiency of the compressor
- η_{tr} : transmission efficiency between the engine and the compressor
- π_C : total compression ratio
- π_{i_C} : compression ratio for each stage
- ρ_a : air density
- A : fuel consumption parameter
- B : fuel consumption parameter
- \dot{m}_C : compressed air mass flow (from the compressor)
- \dot{m}_{f_DE} : fuel mass flow injected in cylinders
- \dot{m}_{in_DE} : air mass flow entering the engine
- \dot{m}_u : capacity of a storage unit
- n_C : polytropic index
- N_C : stage number of the compressor
- N_{max_unit} : number of maximum storage units
- ND_{aut} : number of days of autonomy
- p_a : inlet atmospheric pressure of the compressor
- p_{out_C} : outlet pressure of the compressor
- p_{st} : storage pressure
- P_C : multi-stage compressor power
- P_{C_1} : single-stage compressor power
- P_{CH} : charge power
- P_{CH_ave} : average charge
- P_{DE} : diesel engine power
- P_{EX_WT} : excess wind power
- P_{max_CH} : maximum charge power
- P_{max_WT} : maximum wind turbine power
- P_{WT} : wind turbine power
- $P_{WT_a}(v_w)$: wind power
- PCI : indicated lower calorific value of the fuel
- R : perfect gas constant for the air
- S_{WT} : swept area
- t_{step} : time step
- T_{st} : storage temperature
- v_w : wind speed
- WPPR : wind power penetration rate

ABSTRACT

In most of the remote areas not connected to main electrical grids, the electricity is provided using diesel generators. The use of renewable energy sources together with diesel generators is a solution to reduce electricity cost and environmental impacts. Thus, the wind-diesel hybrid system with compressed air energy storage (WDCAS) is one of the best alternatives in remote areas. While the knowledge about this kind of technology is continuously improving, the research of the best system performances needs to be based on more elaborate sub-system modelling and optimizations. We analyse in this paper the influence of compressed air energy storage (CAES) parameters on WDCAS performance using techno-economic and logistic criteria. Recommendations are made on the choice of CAES parameters and best conditions of using this hybrid energy system.

KEYWORDS: *remote areas, hybrid power generation, wind power, diesel, compressed air energy storage, optimization*

I. Introduction

Scattered throughout the Canada, the remote communities represent an important energetic challenge. Indeed, with more than 200,000 people [1], whose energy consumption is still increasing, and the lack of connection to the main electricity grid, the issue of electrification of remote sites needs to be addressed. As the connection to the main energy network is too expensive, these communities produce then locally their electricity [2]. Most of the time, this energy is produced by using non-renewable sources as diesel generators. Although diesel generators allows having a continuous, stable and reliable energy production, the use of fossil fuels raises economic, environmental and sustainability issues. That's why the use of renewable sources to replace some of the diesel fuel has been extensively studied the last few years [2-4]. More exactly, the hybridization of these energies with diesel generators offers the best agreement. Thus, during the last few years, numerous studies of hybrid renewable-diesel systems have been realized for practically all renewable sources considering or not of a storage system. Among them, the **Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage (WDCAS)** seems to be one of the best solutions in remote areas [5-7].

This paper is a direct continuation of a previous study about the development of a simulation tool for WDCAS [8]. Using this tool, we complete a performance analysis to determine the best choice of compressed air storage parameters based on technical, economic and logistic criteria. In sections II, III and IV we are presenting quickly the WDCAS and the simulation software. In sections V and VI we complete the analysis and choice of compressed air storage parameters and determine the resulting performances of the WDCAS.

II. State of the art of the WDCAS

Several recent studies demonstrated that the WDCAS is an efficient solution to reduce fuel consumption by increasing the power penetration of renewable energy combined with the optimization of diesel engine supercharging using stored compressed air [9, 10]. The cost, simplicity, lifespan and efficiency to reduce fuel consumption and greenhouse gas (GHG) emissions are the main advantages of this new technology that makes it most suitable for wind-diesel hybridization [9-15]. These advantages are making the WDCAS one of the best solutions for the electrification of remote sites.

The main components of a WDCAS are always the same, i.e. the initial energy source (diesel), the renewable energy source (wind) and the compression and storage system (compressor and reservoir) [16]. Other subsystems must be added to ensure the management of energy flows and correct operation of the hybrid system as: expander, dumping loads, automatic control systems, heat exchangers, air flow regulators (Figure1). The use of the WDCAS can be adapted to site parameters through the wind power penetration rate (WPPR) defined as the ratio between the installed wind power and the maximum charge.

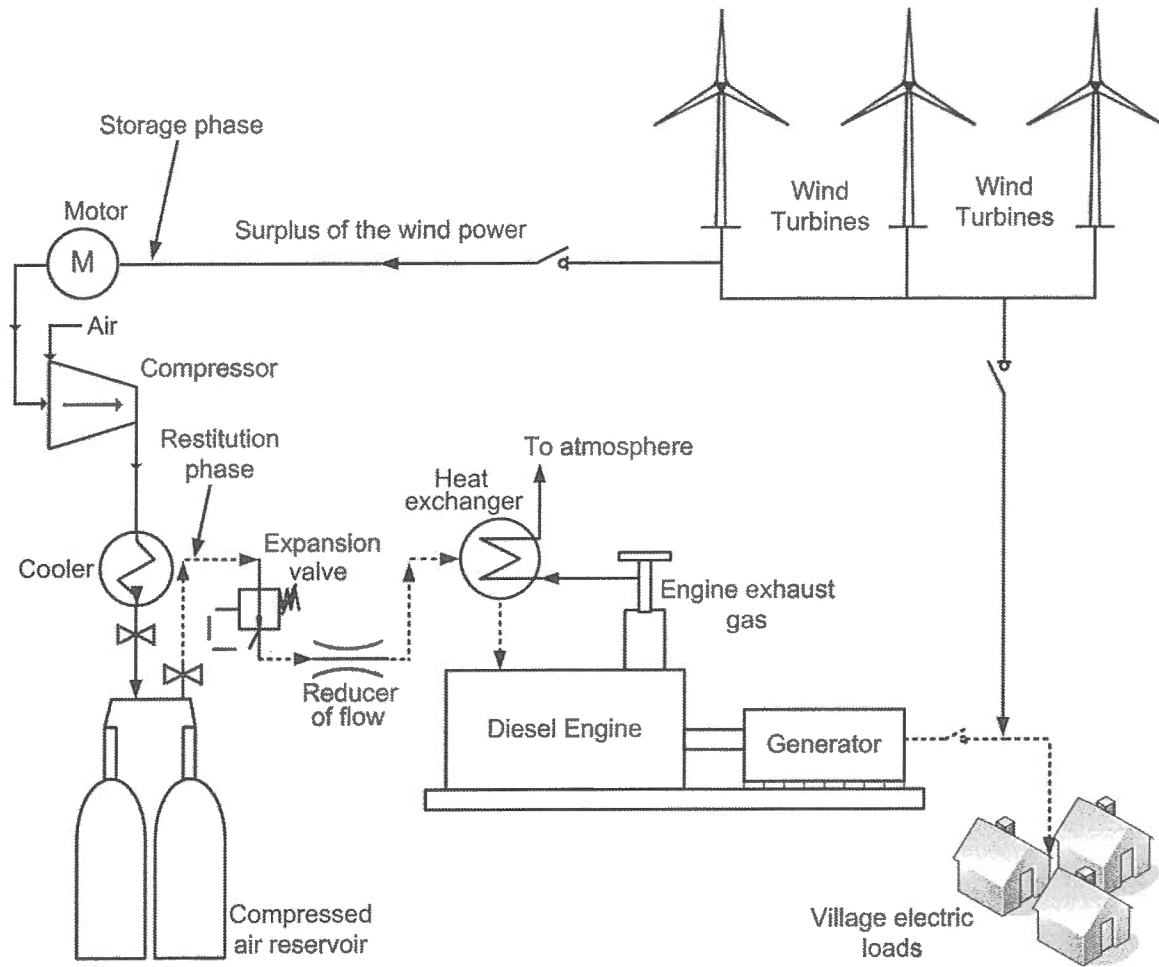


Figure 16 : Illustration of the WDCAS [2]

The operation of the WDCAS is based on the use of the wind turbines, the diesel generators and the reserve of compressed air depending of the wind resource and the load. Thus, diesel engines and wind turbines contribute to supply the load. If wind power is in excess (strong wind regimes), it is used to compress the air which is stored in a tank that can be underground or superficial. During low winds periods, this air is injected into the engine that operates either in supercharged, hybrid or pneumatic mode according to the required power [17, 18]. Regardless of the operation mode, the stored compressed air serves to improve engine performance and reduce fuel consumption.

Although the optimisation of diesel supercharging with compressed air has been studied for long-time especially in automotive industry, the design and feasibility studies of the WDCAS

are much more recent. Each of them demonstrated that the use of a WDCAS resulted in significant reduction of diesel generators operation frequency and fuel consumption [19].

To complete the theoretical studies [15-19], operational tools have been developed for experimental validation or for system design. Thus, an experimental test bench is operated at the TechnoCentre éolien (Gaspé, Canada) [20], [1], [2] and a design software is available [8]. This software has been used to complete this study; its features are presented in the next section.

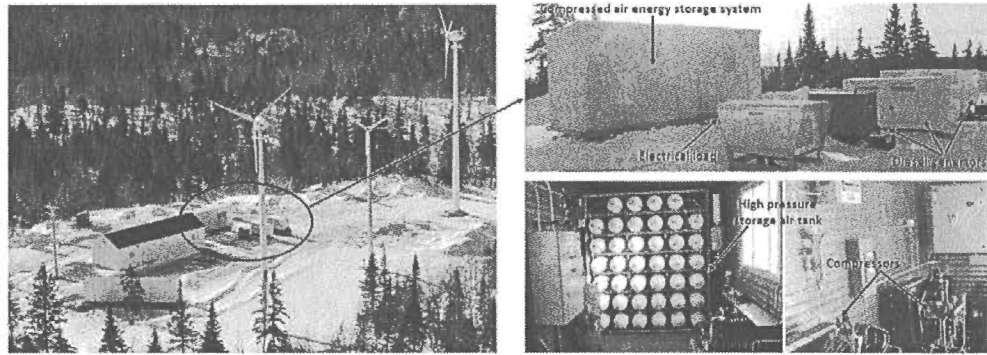


Figure 17: Microgrid of TechnoCentre éolien [1], [2]

In previous papers, the performance of a WDCAS system has been determined for specific implementation scenarios, i.e. high or low penetration, high or low storage, etc. [8, 19, 21-22]. The sizing and calculations involved in the design and performance analysis of such a hybrid system have not integrated all possible optimization scenarios. With the development of the WDCAS software, the system operation is studied over a complete one year period and takes into account all the parameters that will affect system performance. Therefore, the WDCAS can be optimized according to specific parameters of the sub-systems. One of the sub-systems that significantly affect the system performances is the compressed air storage. Thus this paper analyses how storage parameters affect system performance and the way they can be optimized.

III. WDCAS software and system model

The developed software [8] determines the energy efficiency (fuel consumption, diesel operation frequency, etc.) of the WDCAS compared to conventional systems as only diesel power plant or a wind-diesel hybrid system. Models are developed for each energy sub-system, i.e. wind turbine, diesel generator (and its possible supercharging) and compressed air storage (compressor, tank). Various functioning modes are implemented to address all possible situations arising in the WDCAS operation.

Over the duration of analysis, at each time step (chosen by the user), the software solves the following power balance equation²:

$$\text{Load} = \text{WindTurbinePower} + \text{DieselGeneratorPower} - \text{PowerCompressedAirStorage} \quad (1)$$

According to wind speed and load at each time step, the power provided by the wind turbines is compared with the load. If wind power is greater, then the excess serves to compress air. If wind power is insufficient, diesel generator, supercharged or not depending on compressed air availability, should provide the balance.

WDCAS design and analysis is based on the physical modelling of its subsystems, the wind turbine, the diesel generator and the compressed air storage.

Load

There is no particular model for the load; the user should provide load data according to each specific project. For example, if the time step is one hour, the user must introduce the hourly variation of the average load over the entire simulation period. If the site data is unknown, the user can use a typical load profile function [23]. According to load data, the software determines the maximum, minimum and average values required in the various calculations of subsystems models.

Wind Turbine Power

The wind power generated is determined at each time step using the corresponding average wind speed and turbine power curve. Thus, the user has to use existing wind speed data on site or the software will generate values for each time step that correspond to local Weibull distribution parameters (shape factor k and scale factor c) [24]:

$$f(v_w) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} * \exp \left[-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k \right] \quad (2)$$

The wind turbine power curve represents the variation of the power output with the wind speed, $P_{WT}(v_w)$, and is provided by each manufacturer [25]. The software uses a database with the power curves of most usual wind turbines. The user can also define and use a power curve for a new wind turbine.

² This is a simplified version of the power balance to illustrate the concept; the equation do not account for dump load or a minimum required power to operate the compressor, as it will be explained later in the paper

One of the main characteristics of a hybrid system is the wind power penetration rate, WPPR, defined as the ratio of installed wind power capacity to maximum load:

$$WPPR = \frac{P_{\max_WT}}{P_{\max_CH}} \quad (3)$$

Different system topologies, operation strategies and economic parameters are specific to each low, medium or high penetration level of wind energy. The user should define the desired WPPR level of the system and the software determines the number of wind turbines needed:

$$NB_{WT} \cong \frac{P_{\max_CH} \cdot WPPR}{P_{\max_WT}} \quad (4)$$

As WPPR has a significant effect on the system performance [20], it is used as an optimisation parameter for WDCAS.

Diesel Generator Power

The WDCAS software allows the use of one or more diesel generators operating in “normal mode” (without supercharging by using compressed air) and/or supercharged with compressed air [26-28]. In normal operation mode, fuel consumption is determined based on the diesel power P_{DE} required from the power balance in Equation (1) and its technical characteristics. The software determines fuel consumption using the relation:

$$\dot{m}_{f_DE} = A \cdot P_{DE} - B \quad (5)$$

In supercharged mode, the stored compressed air is used such as to maintain an air/fuel ratio (λ) value resulting in optimal diesel efficiency. Previous studies [29] have shown that maximum efficiency of the diesel engine ($\eta_{iDE} \cong 56\%$) is reached for an air/fuel ratio of $\lambda_{opt} \cong 53$. Therefore, the fuel rate and compressed air flow rate required to supercharge the diesel are determined from the following equation:

$$P_{DE} = PCI * \eta_{iDE} * \frac{\dot{m}_{in_DE}}{\lambda_{opt}} \quad (6)$$

In the software model we are considering a technical constraint for the operation of diesel engine, i.e. that it cannot operate at less than 30% of its nominal power. Thus, when the diesel power required to satisfy Equation 1 is less than 30% of its nominal power we consider that the engine will automatically operate at this limit of 30%. This will result in an excess of power production that will be dissipated in a dump load.

Compressed air storage

The model for compressed air storage describes both the compressor characteristics and the tank features and is described in detail in Section IV.

Software Validation

The WDCAS software results have been compared, for operation conditions available on both simulation platforms, i.e. wind-diesel system without storage, to HOMER© software, a recognized reference for hybrid system design and analysis [23]. Using as case study, the data from the implementation of a mining camp in Northern Canada, the differences between the two programs were less than 10% for all performances and input parameters [8]. Considering the inherent data probability variations and operating software characteristics these differences are acceptable.

IV. Compressed air energy storage model

In this section, the compressed air storage model is presented in detail to highlight the main parameters that will affect WDCAS performances and will be used for design choices. Thus, we model separately the two main components of the storage system, the compressor and the reservoir.

Compressor characteristics

The power P_c available to operate the compressor is the excess of wind energy above the load (see Equation 1). The compressor model uses the physical parameters related to air compression phenomena [30]. The software doesn't have predefined compressors parameters and the user should choose them according to technical, economic and logistic considerations.

For a single stage polytropic compressor, the relation between power and compression ratio is defined by:

$$P_{c_1} = \frac{n_c}{n_c - 1} * \dot{m}_c * r * T_{st} * \left[\left(\frac{p_{ou_c}}{p_a} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c}} - 1 \right] * \frac{1}{\eta_{p_c}} \quad (7)$$

The polytropic exponent (n_c), the storage temperature (T_{st}), the outlet pressure of the compressor (p_{ou_c}), the atmospheric pressure (p_a) and the polytropic efficiency of the compressor (η_{p_c}) are affecting the required compressor power and the overall efficiency.

To increase the compression ratio, several multi-stage compressors or a multi-stage compressor can be used. With identical compression ratio for each stage, this latter can be expressed as follows:

$$\pi_{i_c} = \frac{p_1}{p_a} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} = \dots = \frac{p_{N_c} (-p_{ou_c})}{p_{N_c - 1}} \quad (8)$$

The resulting compression ratio for the whole compressor will be:

$$\pi_c = \frac{p_{out}}{p_a} = (\pi_{i_c})^{N_c} \quad (9)$$

Considering that the outlet pressure is identical to the storage pressure, the relation between the multi-stage compressor power and compressed air mass flow rate becomes:

$$P_c = \frac{n_c N_c}{n_c - 1} * \dot{m}_c * R * T_{st} * \left[\left(\frac{p_{out}}{p_a} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c N_c}} - 1 \right] * \frac{1}{\eta_{p_c}} \quad (10)$$

The influence of N_c , the number of compressor stages, on the performance will be studied.

On the other hand, the compressor power is equal to the wind power surplus adjusted with electric motor and transmission efficiencies:

$$P_c = P_{EX_WT} * \eta_{tr} * \eta_e = (P_{WT} - P_{CH}) * \eta_{tr} * \eta_e \quad (11)$$

The electric motor efficiency η_e and mechanical transmission η_{tr} will directly affect system performances.

An additional parameter, the minimum power required for compressor operation, will determine the moment when the compressor can operate.

Storage tank characteristics

The most important parameter of this subsystem is the **storage unit** which represents the quantity of compressed air coming out from the tank that is required to supercharge the diesel such as to deliver a power equivalent to the average charge during one time step (generally one hour) at optimal conditions. Thus, the maximum efficiency of the diesel engine ($\eta_{i_{DE}} \cong 56\%$), reached for an air/fuel ratio of $\lambda_{opt} \cong 53$ are used to determine the storage unit as follows:

$$\dot{m}_u = \frac{\lambda_{opt} * P_{CH_ave}}{\eta_{i_{DE}} * PCI} \quad (12)$$

The user should provide the number of days of autonomy during which the system should provide energy without wind, by using only the supercharged diesel generator. The resulting number of storage units is determined as:

$$N_{max_unit} = ND_{auto} * 24 * 3600 * \frac{t_{step}}{1\ Hour} \quad (13)$$

If the time step is one hour (which is usually the case), the last term in the equation is equal to unity. The volume of the storage tank will be:

$$V_{st} = \frac{N_{max\ unit} \cdot \dot{m}_u \cdot R \cdot T_{st}}{p_{st}} \quad (14)$$

Parameters used for performance analysis

The main storage parameters that will affect WDCAS performances, i.e. fuel consumption, diesel operation frequency, etc. are presented in Table 1. We will study the influence of each one of these characteristics and determine the optimal choice according to technical, economical and logistic criteria.

Table 1: Storage parameters for the performance analysis of the WDCAS

Number of compressor stages
Polytropic exponent
Atmospheric pressure
Storage temperature
Polytropic efficiency
Compressor motor efficiency
Minimum allowable power for storage
Storage pressure
Number of days of autonomy

V. Influence of CAES parameters on WDCAS performance

Case study for the analysis

We consider real data from a mining camp located in Northern Canada [8], in a completely remote area, not connected to the electrical distribution grid. The data used in this analysis is presented in Table 2:

Table 2: Data for the case study

		Data	Information
Annual load		Avg: 19,9 kW; Max: 50 kW; Min: 7 Kw	
Annual wind resource		Wind speed average : 5,1 m/s	
Diesel generator		Power : 5 x 12 kW	D13-2 Caterpillar
Wind turbine	Low penetration	Power : 2 x 10 kW	BWC Excel-S Bergey
	High penetration	Power : 4 x 10kW	

Reference "ideal" storage conditions

We defined reference conditions for the compressed air storage to be used for WDCAS performance analysis. These conditions are “ideal” when referring to subsystems efficiency, i.e. polytropic efficiency, compressor motor efficiency or operating conditions, i.e. number of compressor stages, minimum power required to operate the compressor, storage pressure, autonomy. In Table 3 are presented these reference values used for storage parameters:

Table 3: Reference values for “ideal” storage parameters

Number of compressor stages (maximum)	7
Polytropic exponent	1,3
Atmospheric pressure	1 bar
Storage temperature	20°C
Polytropic efficiency	100%
Compressor motor efficiency	100%
Minimum required power for compressor operation	0 kW
Storage pressure	2 bars
Number of days of autonomy	1000 (infinite tank volume)

Performance analysis

Starting with the reference values we vary the storage parameters to determine their influence on WDCAS performances, i.e. the fuel consumption and the dissipated power³. The storage parameters under study are⁴ 1) the number of compression stages; 2) the polytropic efficiency; 3) the compressor motor efficiency; 4) the storage pressure⁵ and 5) the minimum allowable power for storage. Two levels (high and low) of the wind power penetration rate (WPPR) are considered in the analysis as indicated in Table 2. The results are presented in Figures 2 to 6.

In Figure 2 it appears that fuel consumption is reduced with an increase in the number of compressor stages. Same behaviour is noticed for both levels of WPPR but for the highest level of wind power penetration fuel, the consumption is lower by approximately 15 000L. It may be noticed that the increase from 5 to 7 stages has practically no influence on fuel consumption. Therefore, from a technical and economical perspective, the use of a 5-stage compressor is considered as optimal.

³ The dissipated power is the power that should be consumed by a dump load as a result of insufficient excess wind power to start the compressor or insufficient storage volume that requires the compressor to stop.

⁴ The compression is done under the following constant conditions: atmospheric pressure (1 bar), storage temperature (20°C) and polytropic exponent of air ($n = 1.3$).

⁵ As the storage pressure has also an influence on the storage volume, we do not study the influence of the number of days of autonomy.

Figure 3 shows that the fuel consumption decreases almost linearly when the compressor efficiency increases from 70% to 100%. This behaviour is expected as a result of Equation (9) where the power consumed by the compressor is proportional with the inverse of the polytropic efficiency. While a similar pattern is observed for both values of WPPR, the decrease of fuel consumption is more important for the higher level of wind power penetration. Currently, most of the compressors available on the market have a polytropic efficiency of 75-85% [19].

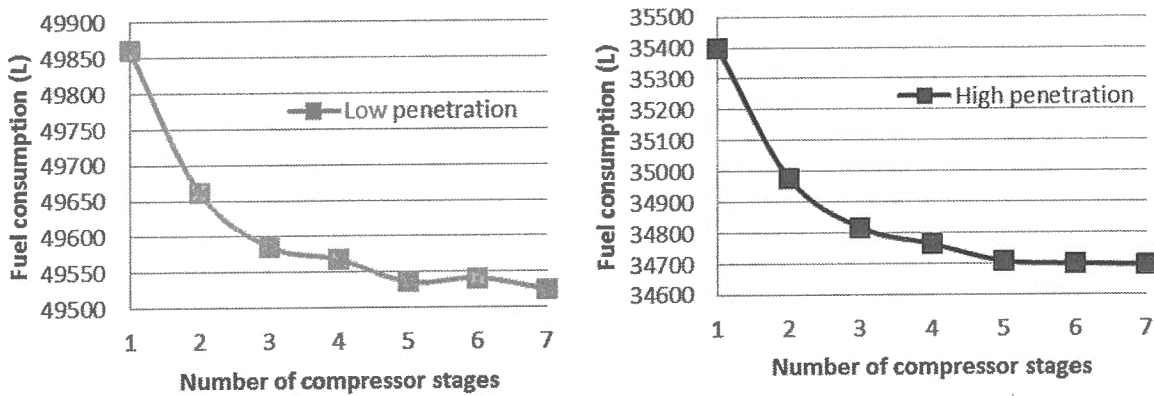


Figure 2: Influence of the number of compressor stages on fuel consumption

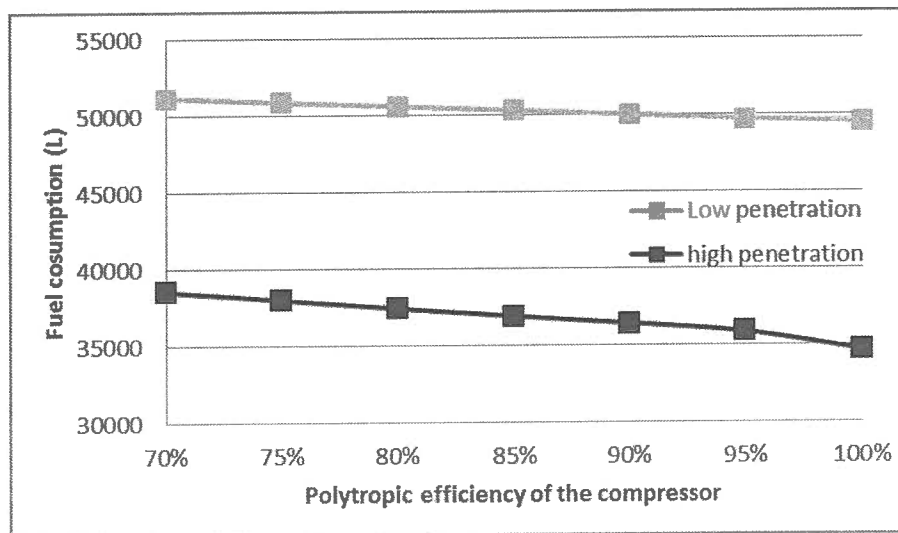


Figure 3: Influence of compressor polytropic efficiency on fuel consumption

Similar influence on fuel consumption is observed in Figure 4 where we study the influence of the compressor motor efficiency. Currently, these motors are close to 95% efficiency [19].

Figure 5 indicates that the storage pressure and consequently the storage volume have an important impact on fuel consumption. Thus, an increase in the storage volume (corresponding to low storage pressure) results in lower fuel consumption. Taking into account spatial and financial constraints, it is not realistic to expect a very large storage volume associated with a low storage pressure. It can be seen in Figure 5 that after a certain pressure, the reduction of fuel consumption is insignificant. Therefore, a storage pressure of 40 to 50 bars represents a good compromise both technically and economically, further increase in storage pressure resulting in negligible fuel economies. Same conclusions are valid for the two values of WPPR but the increase of fuel consumption is more pronounced for the higher penetration level.

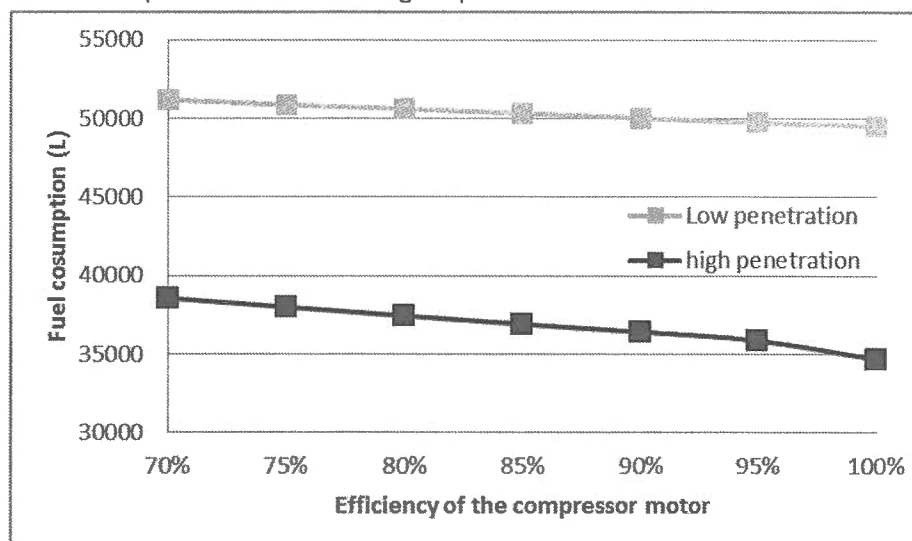


Figure 4: Influence of compressor motor efficiency on fuel consumption

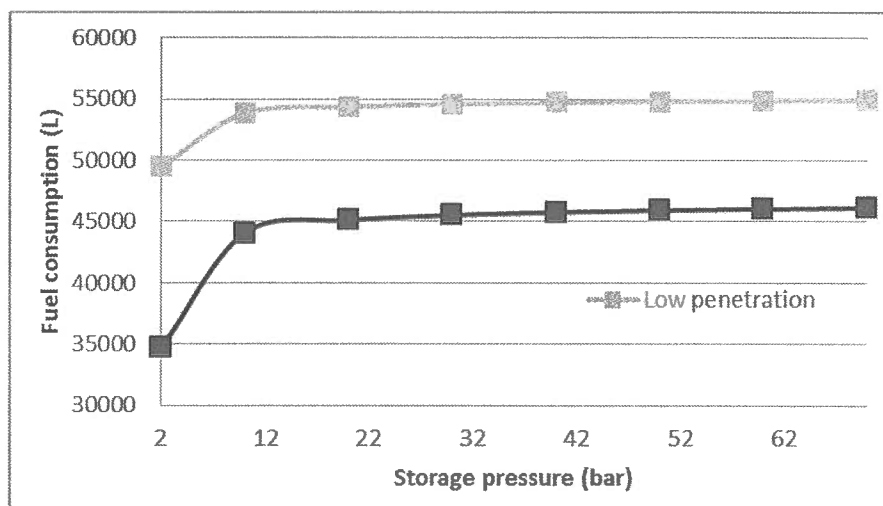


Figure 5: Influence of storage pressure on fuel consumption

The results in Figure 6 highlight the influence of the minimum power required to start the compressor; it is only when excess wind power is larger than this value that the energy can be recovered and stored. The consequence of an increase in the minimum power required to start the compressor is an increase in fuel consumption, a lower quantity of stored compressed air and an increase of the quantity of dissipated energy. The dissipated energy originates from the wind power surplus that is insufficient to run the compressor. A dump load should be added to balance the power balance (Equation 1). It can be noticed that after a certain power level, the influence of required power to operate the compressor is negligible for a low wind power penetration rate which is not the case for the high WPPR.

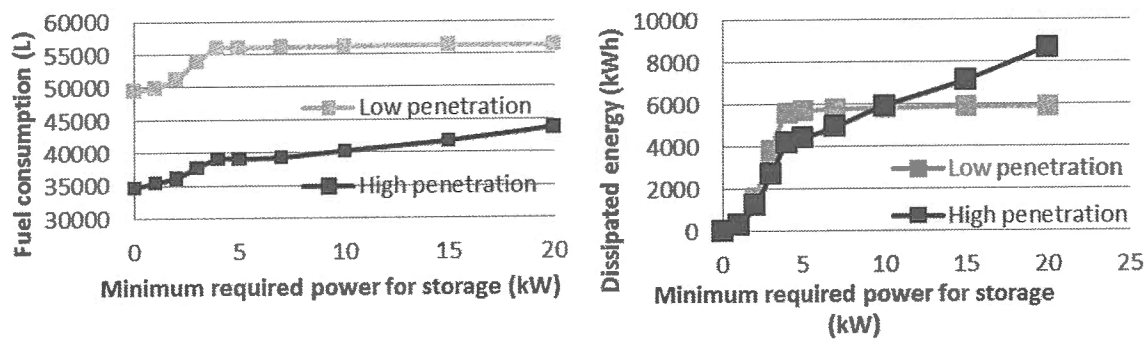


Figure 6: Evolution of the fuel depending on the minimum allowable power for storage

The storage parameters have significant influence on WDCAS performances, i.e. the overall fuel consumption. Thus, for the design of the WDCAS, the choice of storage characteristics is very important and affects system efficiency. In the next section we explore a procedure to choose compressed air energy storage parameters according to their influence on fuel consumption and based on technical, economic and logistic criteria.

VI. CAES Design and WDCAS performance analysis

Several studies addressed the design and techno-economic analysis of a hybrid system taking into account the size and characteristics of energy production systems, i.e. the wind turbines and diesel generators [29, 31-34]. We are studying here the criteria that affect the choice of CAES parameters and fix the wind turbine and diesel generator features.

Design criteria

Usually an energy system design is done using financial data in such a way to reduce the overall cost of the kWh produced. In this case, the WDCAS system is still at the development level, the existing installations have been done for the sole purpose of R&D and demonstration and the financial data (investment and operation costs) are not relevant for an industrial exploitation. Therefore, the criteria used for system design is the reduction of fuel consumption which

represents well the impact of compressed air storage both on operation costs and GES emissions (carbon credit trade). Through the previous section, the analysis illustrated how the storage parameters affect the fuel consumption of the WDCAS which represent the main techno-economic criteria for the design choices [35, 36]. Moreover, the storage pressure has an impact on the storage volume and the required space which is a logistic criterion for the design.

Thus, using the results of the analysis in previous section (Section V), we can determine the impact of the different compressed air storage parameters on the chosen technical, economical and logistic criteria. The impact of CAES parameters on fuel consumption (technical criterion) of the WDCAS is quantified using models in Section IV and results in Section V. The influence of CAES design parameters on economic and logistic criteria is more difficult to quantify and requires in depth commercial feasibility study. However, in Table 4 we summarize the qualitative elements related to economic and logistic impacts that should be considered in the design of CAES:

Table 4: Impacts of CAES design parameters on economic and logistic criteria

Technical parameter of CAES	Economic impacts	Logistic impacts
Number of compressor stages	The cost of an additional stage	The complexity and size of the compressor rise with the number of stages
Polytropic efficiency	The cost of a more efficient compressor	-
Compressor motor efficiency	The cost of a more efficient compressor motor	-
Storage pressure	Cost of reservoir	The storage volume and the implantation space vary with the pressure
Minimum required power for compressor operation	The cost of a more performant compressor and cost of a dump load to absorb the surplus power	The implantation space for a dump load

Choice of CAES design parameters

Considering the technical, economic and logistic criteria, the results of the performance analysis, the availability and relative price for different equipment⁶ we are presenting in Table 5

⁶ Considering the level of development of this technology and availability of commercial equipment, the information used to make these choices is more relevant for an R&D or demonstration project than for a commercial application!

the chosen CAES design parameters that will be used for an in depth study of WDCAS performance:

Table 5: CAES design parameters based on optimisation criteria

Number of compressor stages	5
Polytropic exponent	1,3
Atmospheric pressure	1 bar
Storage temperature	20°C
Polytropic efficiency	85%
Compressor motor efficiency	95%
Minimum required power for storage	1 kW
Storage pressure	10 bars
Number of days of autonomy	7
Wind turbine	Bergey BWC Excel-S – 10 kW
Number of wind turbines	2 (low WPPR) or 4 (high WPPR)
Total wind turbine power	20 kW (low WPPR, 40%) or 40 kW (high WPPR, 80%)
Diesel generator	Caterpillar D13-2 – 12 kW
Number of diesel generator	5
Total diesel generator power	60 kW

WDCAS performance analysis

Based on CAES parameters in Table 5 we determine WDCAS performance for a high (80%) and a low WPPR (40%). The synthesis of the results is presented in Figure 6. The comparison is done mainly for the fuel consumption for three different operation scenarios, i.e. diesel only, wind-diesel and wind-diesel with compressed air storage used to supercharge the diesel engines. Thus, for the fuel economy of the wind-diesel system is about 15% for low WPPR and 28% for high WPPR. The addition of compressed air storage and diesel supercharging has only a limited impact for these configurations with an additional economy of 3.5% for low WPPR and 7.8% for high WPPR.

Results		Results	
Minimal load	7,00 kw	Minimal load	7,00 kw
Average load	19,92 kw	Average load	19,92 kw
Maximal load	50,00 kw	Maximal load	50,00 kw
Average wind speed	5,10 m/s	Average wind speed	5,10 m/s
Only diesel consumption	66614 L	Only diesel consumption	66614 L
WDS diesel consumption	56321 L	WDS diesel consumption	47774 L
WDCAS diesel consumption	54304 L	WDCAS diesel consumption	44032 L

Figure 6: WDCAS software results for a low WPPR (left table) and a high WPPR (right table)

As mentioned in a previous section we consider in the software a technical constraint associated with diesel engine operation at a minimum power rate of 30%. Thus, when diesel power required to balance Equation 1 is less than 30% of its nominal value, the engine is forced to operate at this limit (30%). This results in an excess power that is used primarily to compress air or is dissipated in a dump load. The energy dissipated in the system originates from different sources, i.e. when excess of wind power over the load is insufficient to operate the compressor, when the diesel operates at a higher regime than required to balance Equation 1 or when the compressed air reservoir is full. The quantity of dissipated energy for the different operations scenarios is presented in Figure 7. The use of compressed air storage results in a significant reduction of dissipated power versus a wind-diesel system.

Dissipated energy		Dissipated energy	
Diesel only	5728 kWh	Diesel only	5728 kWh
WDS	5877 kWh	WDS	10692 kWh
WDCAS	68 kWh	WDCAS	71 kWh

Figure 7: Dissipated energy for different configurations with a low WPPR (left table) and a high WPPR (right table)

Figure 8 illustrates that for 78.5% (with a low WPPR) and 84,4% (with a high WPPR) of the time respectively, the WDCAS system operates with a maximum of two diesel generators out of the five installed. This is rather interesting because it allows knowing if the number of generators is adequate when hybridization with storage is envisaged. Thus, given the very low rate of utilization of the fifth generator, it would be appropriate to change some settings to determine if it could not be removed. This analysis is even more important if a higher WPPR is possible to be installed.

Figure 9 shows a comparison of the operation frequency of diesel generators between the different configurations, i.e. diesel only, wind-diesel and wind-diesel with compressed air storage. For wind-diesel and WDCAS systems, most of the time two generators are sufficient to provide required power balance and is possible to consider elimination of at least one diesel generator with a higher WPPR.

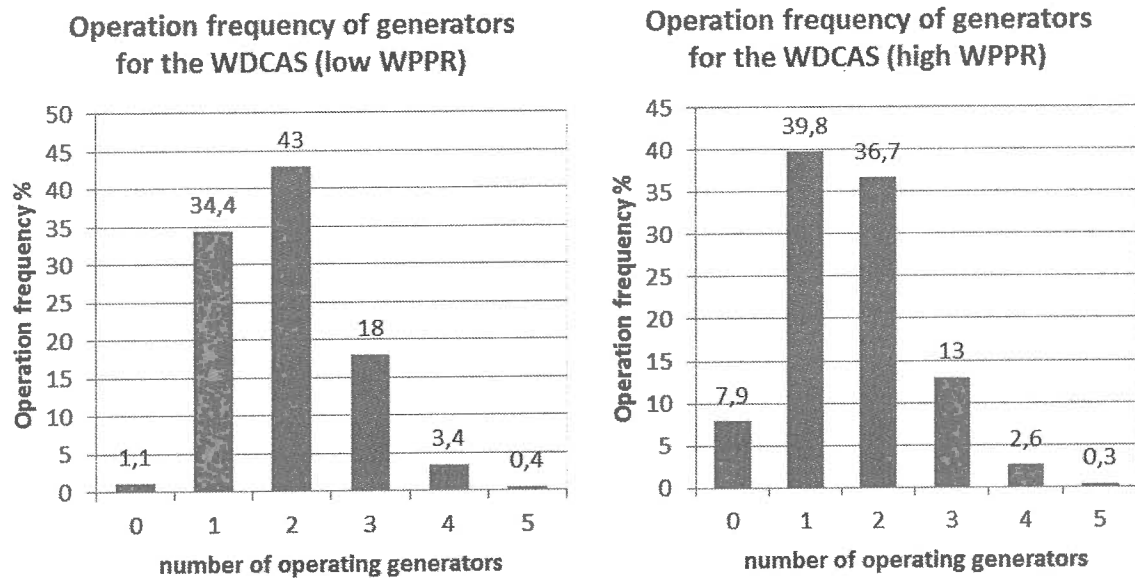


Figure 8: Operation frequency of diesel generators for WDCAS system

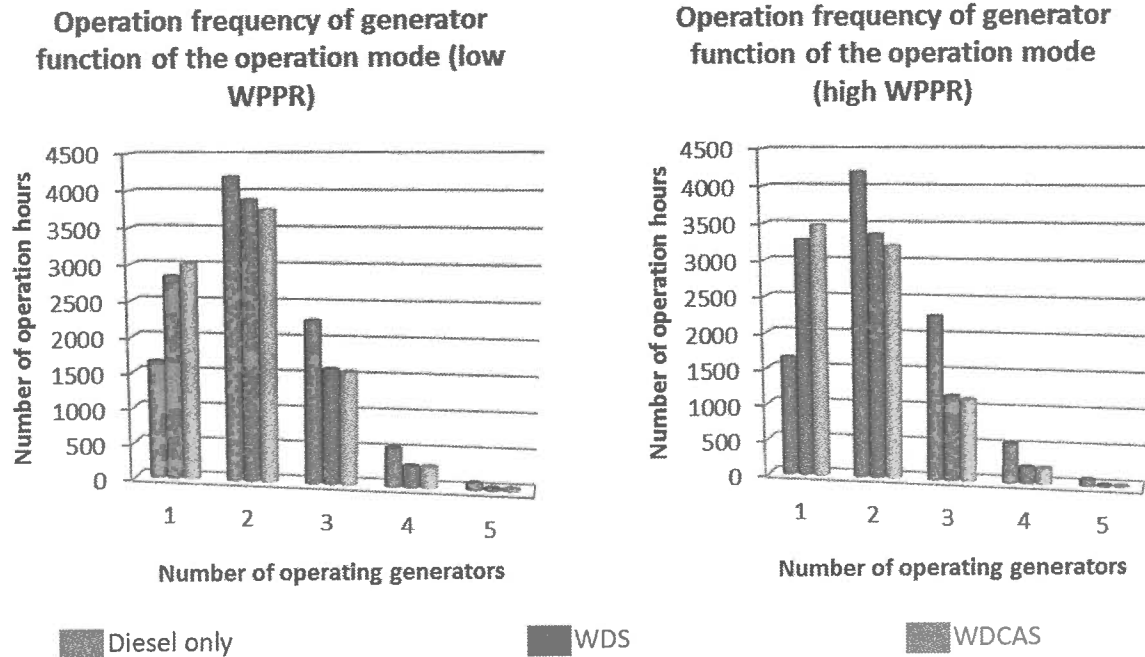


Figure 9: Comparison of the number of operating hours of diesel generators for the three configurations: diesel only, wind-diesel system and wind-diesel system with compressed air storage

Figure 10 illustrates the frequency of the operating modes of the diesel generators. For a low WPPR (40%), the chosen site, with a low average wind speed, is not suitable for the implementation of compressed air storage as the generators are almost operating in supercharged mode only 10% of the time. They can be stopped 1% of the time, when wind power is in excess of the load. Therefore, at low WPPR, the difference between the wind-diesel system and the WDCAS system, regarding the operation time of diesel engines, is minimal. For a higher WPPR (80%), the use of compressed air storage becomes more interesting as the diesel generators operate in supercharged mode for 20% of the time. In this case, the generators can be completely stopped during 8% of the time.

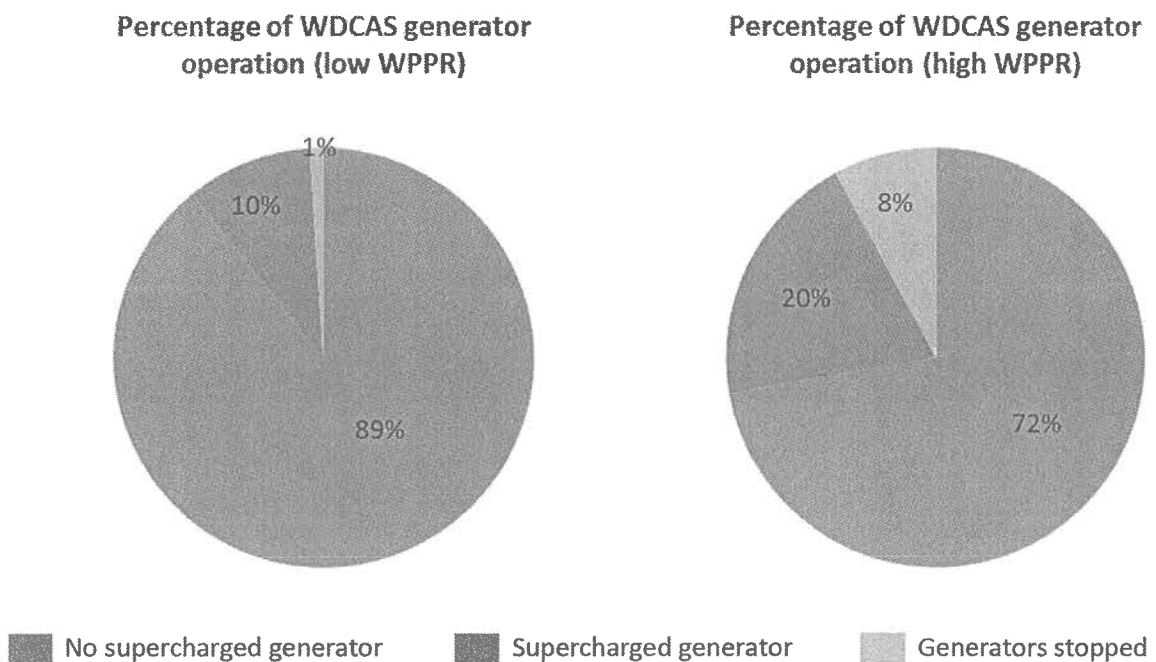


Figure 10: Time percentage of the operation modes of diesel generators for WDCAS

The previous results show the influence of the WPPR in justifying the implementation of compressed air storage. For this site (average wind speed 5.10 m/s) the use of compressed air storage with a low WPPR (40%) is not justified. Even with a higher WPPR (80%) we consider that the advantages of compressed air storage in fuel economy and operation time of diesel generators do not justify the investment and the additional complexity of operation. These results are in good agreement with the conclusions of a previous study [13] that a minimum wind speed is required to justify implementation of wind-diesel system. Additional cost and system complexity associated with the storage system requires higher wind speed sites and higher wind power penetration (WPPR) to become cost effective.

Therefore, we are exploring two other configurations to determine how the WDCAS system performances compare with diesel only or wind-diesel system. A higher WPPR value,

120%, is considered which corresponds to 60kW of installed wind power, i.e. 6 turbines Bergey BWC Excel-S–10 kW. The performance of this configuration is analyzed both on the original site with an average wind speed of 5.10 m/s and on a site with a higher average wind speed of 6.50 m/s.

With this new 120% WPPR, the same CAES parameters from Table 5 are used to compare WDCAS performance with diesel only and wind-diesel systems on the original site (average wind speed 5.1 m/s) and a site with a higher average wind speed of 6.5 m/s. The synthesis of the results is presented in Figure 11 and consists in a comparison of fuel consumption for the three different operation scenarios, i.e. diesel only, wind-diesel and wind-diesel with compressed air storage and supercharging. Thus, for the wind-diesel system, fuel economy is 37.4% with a WPPR of 120% WPPR on the original site (5.10m/s average wind speed) and 54.4% on the windiest site (6.5m/s average wind speed). The use of compressed air storage and diesel supercharging results in an additional 18.7% economy on the original site and 50.2% on the windiest site (average wind speed of 6.5 m/s).

Results		Results	
Minimal load	7,00 kw	Minimal load	7,00 kw
Average load	19,92 kw	Average load	19,92 kw
Maximal load	50,00 kw	Maximal load	50,00 kw
Average wind speed	5,10 m/s	Average wind speed	6,50 m/s
Only diesel consumption	66614 L	Only diesel consumption	66614 L
WDS diesel consumption	41723 L	WDS diesel consumption	30445 L
WDCAS diesel consumption	33937 L	WDCAS diesel consumption	15144 L

Figure 11: WDCAS software results for a 120% WPPR on the original site (left table) and a site with a higher average wind speed of 6.5 m/s (right table)

The quantity of dissipated energy in the dump load for the different operations scenarios is presented in Figure 12. As mentioned before, energy should be dissipated when excess of wind power over the load is insufficient to operate the compressor, when the diesel operates at a higher regime than required to balance Equation 1 (at a minimum of 30% of its nominal power) or when the compressed air reservoir is full. The use of compressed air storage results in a significant reduction of dissipated power versus a wind-diesel system. It appears that in windiest site (right column) the dissipated energy is high even for the WDCAS system which suggests an insufficient storage volume.

Dissipated energy		Dissipated energy	
Diesel only	5728 kWh	Diesel only	5728 kWh
WDS	22372 kWh	WDS	59554 kWh
WDCAS	71 kWh	WDCAS	15179 kWh

Figure 12: Dissipated energy with a 120% WPPR on the original site (left table) and a site with a higher average wind speed of 6.5 m/s (right table)

The results in Figure 13 show that 88.4% (site with 5.10 m/s average wind speed) and 95.5% (site with 6.5 m/s average wind speed) of the time respectively, the WDCAS system operates with a maximum of two diesel generators out of the five installed. The number of generators should be reduced when this hybridization with compressed air storage is considered.

A comparison of the operation frequency of diesel generators between the different configurations, i.e. diesel only, wind-diesel and wind-diesel with compressed air storage is illustrated in Figure 14. For both wind-diesel and WDCAS systems, most of the time two generators are sufficient to provide the required power balance (Equation 1) and is possible to eliminate at least one diesel generator in each case.

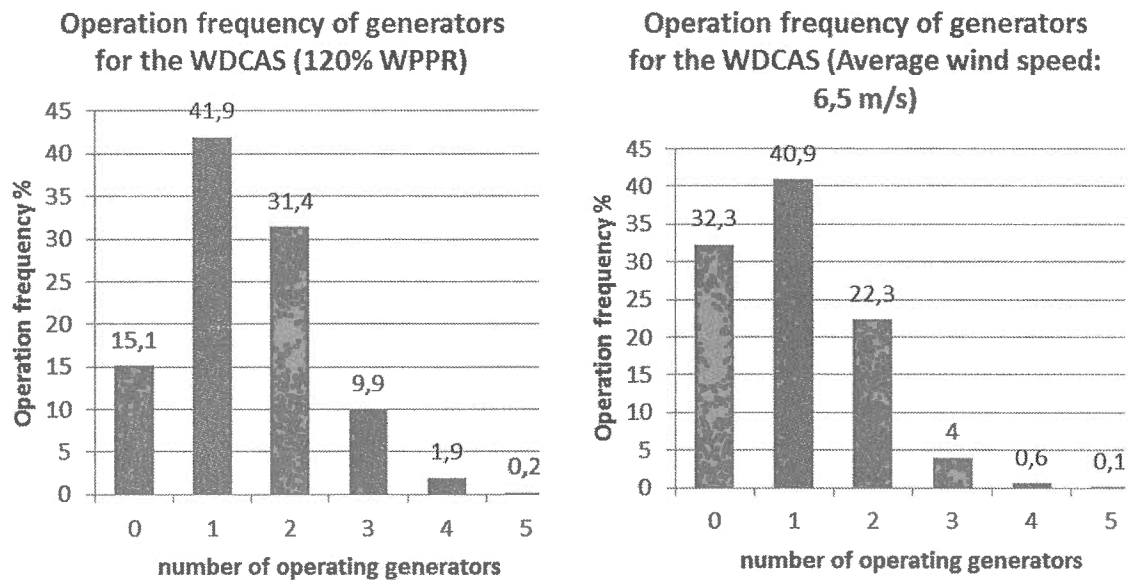


Figure 13: Operation frequency of diesel generators for WDCAS system

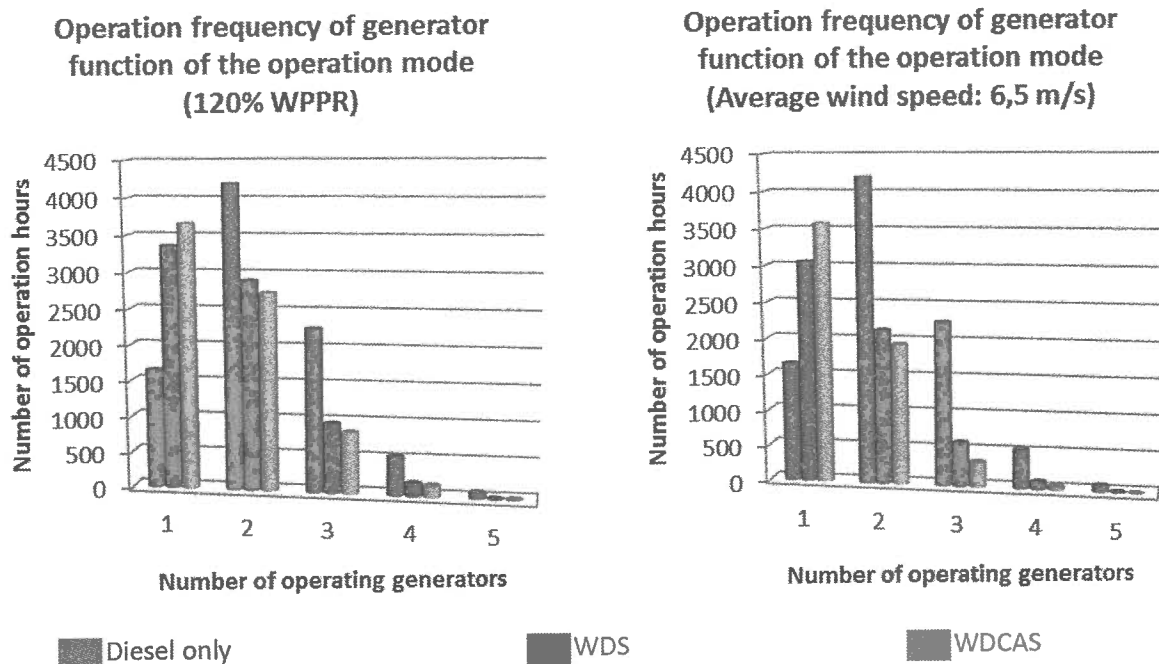


Figure 14: Comparison of the number of operating hours of diesel generators for the three configurations: diesel only, wind-diesel system and wind-diesel system with compressed air storage

Figure 15 illustrates the frequency of the operating modes of the diesel generators. With a WPPR of 120% on the original site (5.1m/s), the generators are operating in supercharged mode 37% of the time and they are stopped 15% of the time, when wind power is in excess of the load. Therefore, at 120% WPPR, the implementation of compressed air storage will allow the operation in supercharged mode for more than one third (1/3) of the time even on a low wind speed site. On the windiest site (average wind speed of 6.5 m/s), the use WDCAS has a significant impact because the diesels operate in supercharged mode for 66% of the time and are completely stopped during 32% of the time.

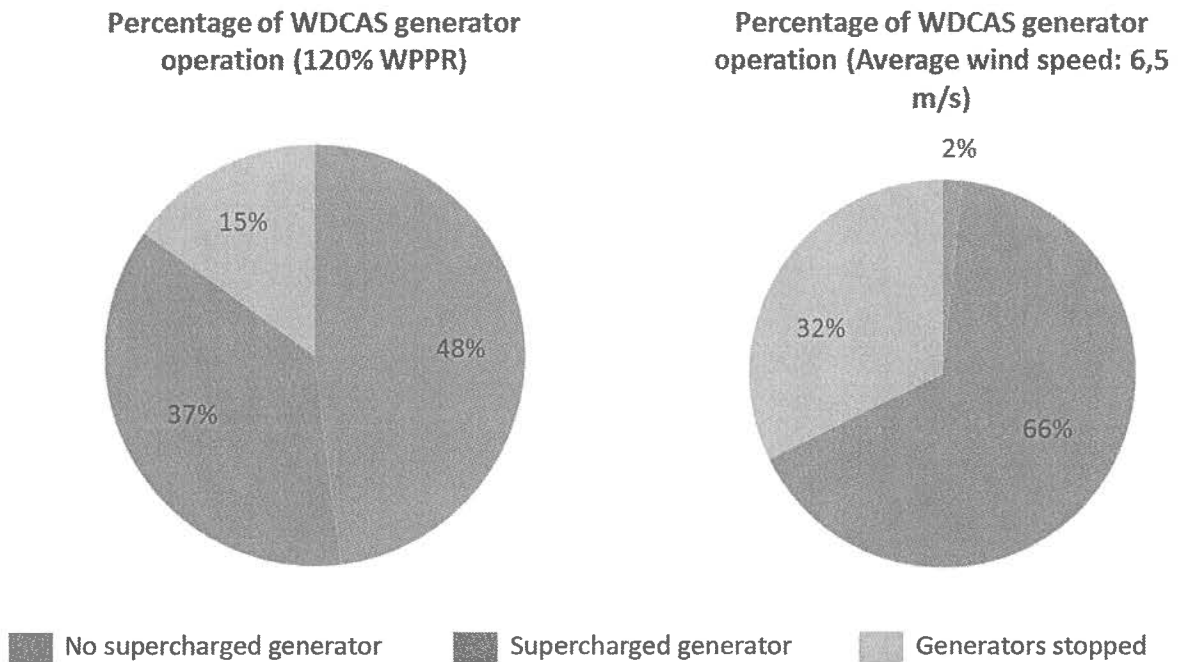


Figure 15: Time percentage of the operation modes of diesel generators for WDCAS

The previous results show the importance of the wind potential on the site and of WPPR on the decision to implement compressed air storage. Should be emphasized the facility to use the software and associated models [8] to explore the influence of different parameters and to choose the most appropriate configuration.

VII. Conclusion

We analyzed in this paper how the different compressed air storage parameters affect the performance of a WDCAS system. Two other elements, the average wind speed on the site and wind power penetration rate (WPPR), are very important to determine the technical and economic justification to use compressed air storage and diesel supercharging. There is a lower value of the average wind speed under which the use of compressed air storage is unjustified at a given site, as concluded also in a previous study [13]. More accurate data about the cost of an industrial implementation of a WDCAS is necessary to do such analysis. When such data becomes available, the model and software presented in this paper can be used to determine the optimal value of WPPR as a function of the average wind speed of the site. An optimal configuration of the WDCAS system based on the performance of different subsystems can also be established.

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support for conducting this research from FRQNT (Fonds de Recherche du Québec Nature et Technologies), MERN (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec) and from Tshiuettin Inc. through the Mining development program.

Bibliography

- [1] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Ramdennee D, Dimitrova M, Perron J, Adegnon M, Boulay D, Arbez C. Potential of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed air system for Nordic remote canadian areas. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):795-804
- [2] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. *Rapport Technique*, Université du Québec à Rimouski, 2008.
- [3] Chauhan A, Saini RP. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 38(2014):99-120.
- [4] Ibrahim H, Ghandour M, Dimitrova M, Ilinca M, Perron J. Integration of wind energy into electricity systems: technical challenges and actual solutions. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):815-824.
- [5] Ibrahim H, Ilinca A, Rousse D, Dutil Y, Perron J. Analyse des systèmes de génération d'électricité pour les sites isolés basés sur l'utilisation du stockage d'air comprimé en hybridation avec un jumelage éolien-diesel. *ConFrEGE*; 2012.
- [6] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Perron J. Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé. *Revue des Energies Renouvelables* 2007; (2007):47-50.
- [7] Ibrahim H., El-Hajj M., Ilinca A., Younès R., Dimitrova M., Arbez C., Boulay D., Adegnon M. Electricity Production in Nordic Village with a Wind-Diesel-Compressed Air Energy Storage System, 9th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition: Large Scale Integration of Wind farms, 15-17 June, Istanbul, Turkey, 2010.
- [8] Martinez N, Ilinca A, Ibrahim H, Benchaabane H., Simulation tool for a hybrid wind-diesel system with CAES. *Applied Energy* 2015; Coming soon

- [9] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance index. Electrical Power Conference, EPC 2007, IEEE Canada, pages:393-398, 25-26 Oct. 2007.
- [10] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems - characteristics and comparisons. Renewable and sustainable energy reviews 2008; 12(2008)1121-1250.
- [11] Ibrahim H, Ilinca A. Techno-Economic analysis of different energy storage technologies. InTechOpen, Published on: January 23, 2013.
- [12] Bridier L, David M, Lauret P. Optimal design of a storage system coupled with intermittent. Renewable Energy 2014; 67(2014):2-9.
- [13] Weis TM, Ilinca A. The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada. Renewable energy 2008; 33(7):1544-57.
- [14] Ibrahim H, Ilinca A. Contribution of the compressed air energy storage in the reduction of GHG-case study: Application on the remote area power supply system. InTechOpen, Published on: August 22, 2012.
- [15] Ibrahim H, Ilinca A, Younes R, Perron J, Basbous T. Study of a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. Electrical Power Conference, EPC 2007, IEEE Canada, pages: 320-325, 25-26 Oct. 2007.
- [16] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Dimitrova M, Perron J. Study and design of a hybrid wind-diesel-compressed air energy storage system for remote areas. Applied Energy, 2010; 87(2010)1749-1762.
- [17] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for wind-diesel energy generation. Energy 2012; 38(2012):264-275.
- [18] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Fuel consumption evaluation of an optimized new hybrid pneumatic-combustion vehicle engine on several driving cycles. International journal of engine research 2012.
- [19] El-Hajj M. Etude de cas de l'électrification d'un village nordique par un système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé à moyenne échelle. Université du Québec à Rimouski, 2009.
- [20] TechnoCentreÉolien.www.eolien.qc.ca/fr/infrastructures/microreseau-couplage-eolien-diesel.html.

- [21] Ibrahim H, Dimitrova M, Ilinca A, Perron J. Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunication isolée. *EJEE* 2009;12(2009):701-731.
- [22] Deck-Leger Z-L. Contrôle d'un système de couplage éolien-diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [23] Weis TM, Ilinca A. Assessing the potential for wind power incentive for remote villages in Canada. *Energy Policy* 2010; 38(2010):5504-5511.
- [24] A. Diop, E. Ceanga, J-L. Rétiveau, J-F. Méthot, Adrian Ilinca – «Real-time three-dimensional wind simulation for windmill rig tests», *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 2268–2290, 2007.
- [25] LeGourieres D. Les éoliennes: Théorie, conception et calcul pratique. Editions du Moulin Cadiou 2008.
- [26] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Moteur diesel suralimenté, bases et calculs, cycle réel, théorique et thermodynamique. Rapport Technique, Université du Québec à Rimouski; 2006.
- [27] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. A new hybrid pneumatic combustion engine to improve fuel consumption of wind-Diesel power system for non-interconnected areas. *Applied Energy* 2012; 96(2012):459-476.
- [28] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Required time response of a variable valve actuator equipping a hybrid pneumatic-combustion engine. *International journal of engine research* 2012; 5(2012):514-528.
- [29] Ibrahim H, Younes R, Basbous Tammam, Ilinca A, Dimitrova M. Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. *Energy* 2011; 36(2011):3079-3091.
- [30] Thierbaut G, Wieser P, Ilinca A, Ibrahim H. Réalisation d'un logiciel de simulation de système hybride éolien diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [31] Kaabeche A, Ibtouen R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy* 2014; 121(2014):149-158.
- [32] Abdelkafi A, Krichen L. Energy management optimization of a hybrid power production unit based renewable energies. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014; 62(2014):1-9.

- [33] El-Khadimi A, Bchir L, Zeroual A. Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien avec système de stockage. *Energies renouvelables*, 2004; 7(2004):73-83.
- [34] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A. Optimal conception of a hybrid generator of eElectricity. *Canadian congress of applied mechanics* 2007.
- [35] Tardif AC. Conception et optimisation de systèmes énergétiques hybrides pour communautés durables. Université de Montréal; 2011.
- [36] Kravtsoff I, Dessante P, Vanier JC, Manfé P, Mouni E. Optimisation global d'un système de génération électrique hybride dans le but de réduire sa consommation de carburant. *Symposium de génie électrique*; 2014.

CHAPITRE 4

FEASIBILITY STUDY FOR A WIND-DIESEL SYSTEM WITH COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE FOR A REMOTE SITE IN CANADA

4.1 RESUME DE L'ARTICLE 3

Dans cet article, est présenté une analyse du dimensionnement optimal d'un SHEDAC destiné pour l'électrification du camp minier d'Esker, un site isolé situé dans le Nord du Québec. L'étude réalisée doit permettre de répondre à la problématique énergétique du camp issue d'un usage peu efficace de la génératrice diesel présentement en place. Pour ce faire, le logiciel de dimensionnement élaboré et présenté dans le premier article est utilisé, puisqu'il est parfaitement conçu pour ce type d'analyse [55]. Compte tenu des différents défis énergétiques de ce site, des études à divers niveaux ont dû être établies :

- a) Une réduction de la consommation énergétique globale du site a été réalisée. En effet, certains postes (chauffage, éclairage) présentent des consommations et des usages totalement inappropriés par rapport à la vie sur le site. Dans le cadre d'une amélioration de l'efficacité énergétique globale du site, une telle analyse est, donc, nécessaire avant même de dimensionner un nouveau système de production d'énergie. Cette étude a, ainsi, permis de réduire la consommation énergétique annuelle moyenne du camp d'environ 30 % ;
- b) Une mise en place de différentes configurations envisageables de SHEDAC a été proposée afin d'en déterminer celle qui serait optimale pour le site d'un point de vue technique et énergétique. Ainsi, ces configurations ont été faites selon trois

modèles de génératrices, trois modèles d'éoliennes et trois systèmes de stockage. Ce sont 27 configurations qui ont été ainsi étudiées et comparées ;

- c) Une matrice décisionnelle, dépendant de plusieurs critères, a été réalisée pour comparer les diverses configurations et en dégager celle qui se présente comme optimale pour l'implantation sur le site du camp Esker.

Le système optimal, qui a finalement été retenu, permet des économies d'environ 70% par rapport à un système composé uniquement de génératrices. Outre les économies énergétiques, la solution proposée se prête parfaitement à son installation sur le site et ses contraintes techniques et énergétiques. Ces résultats ont été obtenus pour un taux de pénétration en puissance éolienne fixé à 65%. Il s'agit d'une valeur reflétant un SHEDAC à moyenne échelle comparable à celui d'une étude similaire [3].

Finalement, les résultats proposés dans cet article permettent de mettre en avant les bénéfices de l'implantation d'un SHEDAC pour un site isolé. De plus, cette étude a permis de mettre en application le logiciel développé dans l'article 1. Ce travail pourrait, donc, servir de prérequis pour les études adjacentes concernant les aspects logistiques et financiers concernant l'implantation du système sur le site, tel que mentionné dans les recommandations du chapitre final.

Dans les sections qui suivent sera présenté l'article 3 tel que soumis au journal «Applied Energy ».

Feasibility study for a Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage for a Remote Site in Canada

N. Martinez¹, A. Ilinca¹, H. Ibrahim², D. Ramdenée³, D. Rousse⁴, A. Chandra⁴

¹Wind Energy Research Laboratory (WERL), Université du Québec à Rimouski, G5L 3A1, QC, Canada

²TechnoCentre éolien, Gaspé, G4X 1G2, QC, Canada

³ Technologic Institute of Industrial Maintenance (TIIM), Sept-Îles, G4R 5B7, QC, Canada

⁴ École de technologie supérieure, Montréal, H3C 1K3, QC, Canada

NOMENCLATURE

- λ : stoichiometric air/fuel ratio
- η_s : electric efficiency of the wind turbine
- η_{i_DE} : indicated efficiency of the engine
- η_{p_c} : polytropic efficiency of the compressor
- η_{tr} : transmission efficiency between the engine and the compressor
- ρ_a : air density
- A : fuel consumption parameter
- B : fuel consumption parameter
- \dot{m}_c : compressed air mass flow (from the compressor)
- \dot{m}_{f_DE} : fuel mass flow injected in cylinders
- \dot{m}_{in_DE} : air mass flow entering the engine
- \dot{m}_u : capacity of a storage unit
- n_c : polytropic index
- N_c : stage number of the compressor
- N_{max_unit} : number of maximum storage units
- ND_{aut} : number of days of autonomy
- p_a : inlet atmospheric pressure of the compressor
- p_{out_c} : outlet pressure of the compressor

- p_{st} : storage pressure
- P_c : multi-stage compressor power
- P_{CH} : charge power
- P_{CH_ave} : average charge
- P_{DE} : diesel engine power
- P_{EX_WT} : excess wind power
- P_{max_CH} : maximum charge power
- P_{max_WT} : maximum wind turbine power
- P_{WT} : wind turbine power
- $P_{WT_R}(v_w)$: wind power
- PCI : indicated lower calorific value of the fuel
- R : perfect gas constant for the air
- S_{WT} : swept area
- T_{st} : storage temperature
- v_w : wind speed
- WPPR : wind power penetration rate

ABSTRACT. In remote areas, difficult to access and not connected to the main electric grids, the electricity is commonly provided by diesel generators. They represent a continuous, stable and safe energy supply. However, the increasing operation costs, GES emissions and environmental risks require implementation of alternative solutions. Thus, the use of renewable energies through hybrid system is the solution that is generally accepted and more and more implemented in these remote sites. Among them, the Wind-Diesel hybrid system with Compressed Air energy Storage (WDCAS) is one of the best solutions to simultaneously increase the penetration of renewable energies and improve diesel efficiency. The technical feasibility study for a Canadian remote site, the Esker camp, is done through an energy efficiency study. Performance improvement and impact of hybridization on fuel consumption and GHG emissions are determined.

KEYWORDS: remote areas, hybrid power generation, wind power, diesel, compressed air, energy efficiency, feasibility study

I. Introduction

Most mining camps are isolated sites, often located in remote areas not connected to electrical distribution grids. Several hundred such sites are situated in Northern part of Quebec province alone (Canada). Energy consumption in these sites represents 25% of production costs. That's the main reason for mining companies to turn toward renewable energies, to reduce the operation cost and GHG emissions associated with the use of diesel generators⁷.

In this paper we study the technical feasibility and the impact on fuel consumption of the installation of a Wind-Diesel system with Compressed Air Storage (WDCAS) to supply electricity to a remote mining camp. This type of hybrid system is aimed for off-grid sites which are numerous in Quebec and Canada, as well as in other parts of the world. Geographic characteristics of these remote sites (distance, mountains, islands, ...) make very difficult and expensive to connect them to electrical distribution grids [1, 2]. Thus, in most of these sites, electrical energy is supplied by diesel generators, a continuous, stable and reliable energy source. However, this option is becoming obsolete due to high operating cost, fuel transportation problems, economic reasons and environmental concerns. Other alternatives are then explored [3].

The use of renewable energy in support of diesel generators has become paramount. Renewable energy can replace fossil fuels directly through production systems (wind turbine, photovoltaic panel, hydroelectric ...) or indirectly through storage devices (compressed air, hydrogen, chemical ...) [4-8]. Thus, various hybrid diesel/renewable energy systems can be used depending on the locally available resources and geographic characteristics. Among them, the wind-diesel hybrid system with compressed air storage (WDCAS) is one of the most effective solutions [9-11].

⁷<http://www.theglobeandmail.com/report-on-business/industry-news/energy-and-resources/miners-turn-to-renewable-energy-to-cut-costs/article1359140/>; <https://www.mern.gouv.qc.ca/mines/>; <http://www.cim.org/>;

Indeed, the use of high penetration wind-diesel power system associated with compressed air energy storage appears as an optimal configuration to supply remote applications [12]. Wind energy is often very abundant in remote areas in Northern Canada and is the cheapest alternative to replace part of the fossil fuel used for electricity generation [13, 14]. On the other hand, the compressed air energy storage (CAES) has been the subject of various comparative studies that demonstrated its advantages as a storage solution for this type of application [15-20]. Indeed, in terms of cost, simplicity, lifetime and contribution to reducing fuel consumption and emissions of greenhouse gases (GHG), this technology is the best when compared to other storage alternatives. The advantages of implementing a WDCAS have been emphasized in previous papers [21-23] and we chose to study the application of this technology for the electrification of a remote site, the Esker mining camp in Northern Québec, Canada.

The Wind-Diesel system with Compressed Air Storage (WDCAS) is illustrated in Figure 1. It consists of three main subsystems: the fossil energy source (diesel generator), the renewable energy source (wind turbine) and the storage system (compressed air). To ensure the energy equilibrium and adequate production and use of compressed air, additional components are needed, such as a multi-stages compressor, expander (pressure or flow regulator), dump load and electric regulation and control system.

The operating principle of a WDCAS is generally always the same, although it may vary depending on the size of the installation and the wind power penetration rate⁸. Diesel generators and wind turbines thus contribute to the load supply. If wind power is in excess (high wind regimes), the surplus of wind energy is used to compress air which is then stored in a tank that can be natural (underground) or superficial. When necessary at low wind regimes, the air is injected into the diesel generators. This allows the diesel generators to operate in different modes: supercharged, hybrid or purely pneumatic (without fuel) [24]. Regardless of the mode, this solution improves engine performance while reducing fuel consumption.

⁸ The Wind Power Penetration Rate (WPPR) is the ratio between the installed wind power capacity and maximum charge

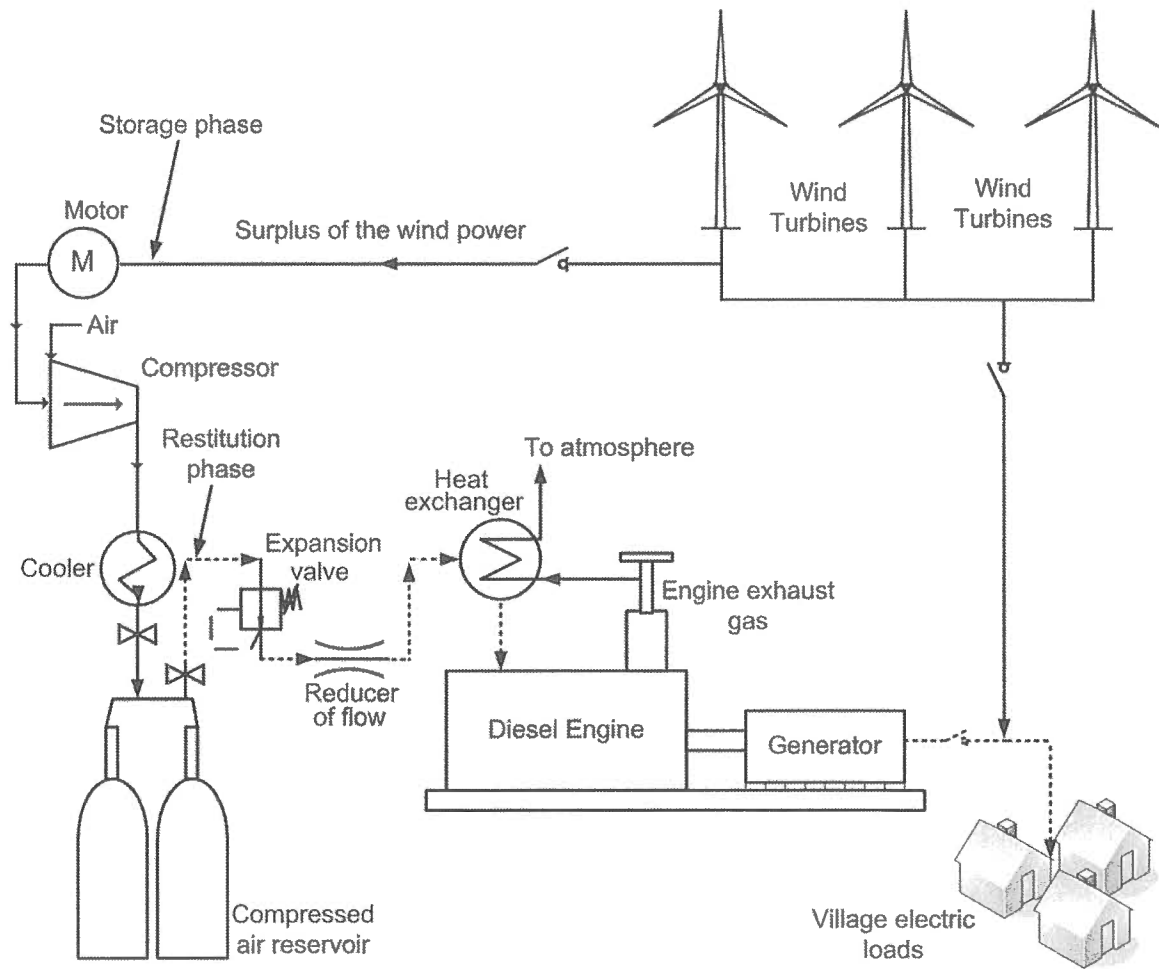


Figure 18 : Illustration of a WDCAS [3]

For a long time, the design of WDCAS, for various applications, was performed using different methods and available commercial design software. In this paper, we apply a recently developed design tool adapted specifically for WDCAS systems [25], to determine the feasibility of such installation at Esker station, a remote mining camp in Northern Canada. One advantage of using this software is that it allows, through a general

interface, to vary the size of all subsystems and, based on a variety of results, to determine the design that provide optimal performance.

II. Esker camp features

Geographical location

The case study is a mining camp belonging to a railway company, connecting the cities of Sept-Iles and Schefferville. Esker is 70 km South of Schefferville in the province of Newfoundland and Labrador. The camp is only serviced by train and is not connected to any electric and water main grids. It is open seven months of year, from May to November, and consists of accommodation buildings for people using the railway line. Figure 2 shows the general views of the current camp.

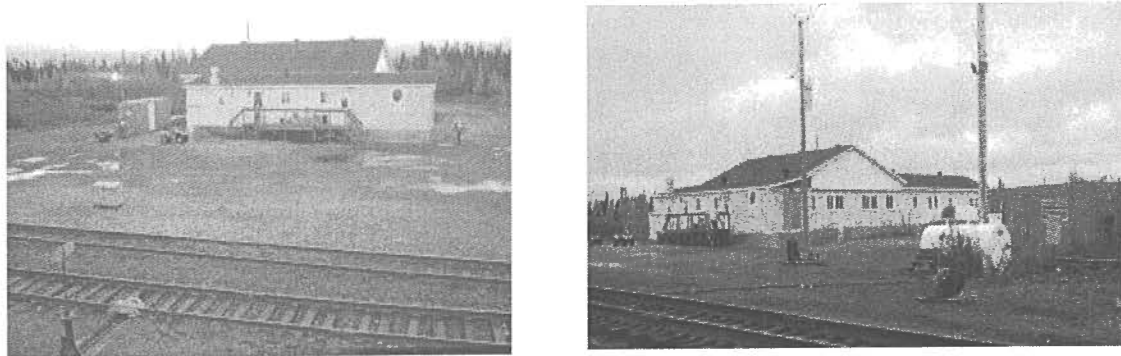


Figure 2: General views of Esker Camp in September

Energy situation

As a remote area, the camp is energetically completely autonomous. A 150kW diesel generator is used to supply the electric needs. The main charges are: heating buildings and water, camp lighting, auxiliary equipment, and water pumping station. The consumption varies depending on the time of day (Figure 3) and the season.

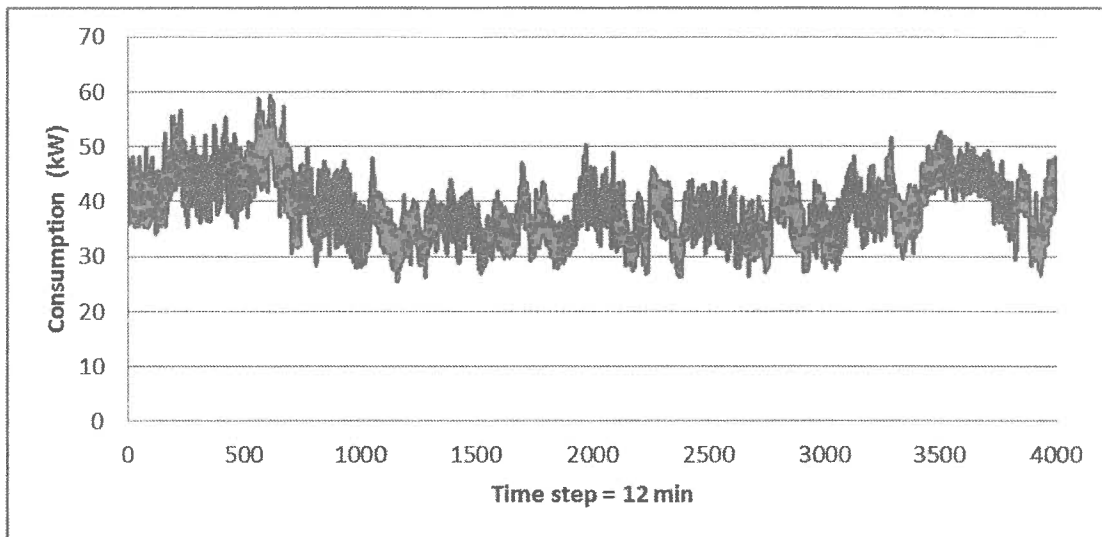


Figure 73: Consumption profile on the site for September 28th, 2014 between 9a.m and 10p.m

Several observations should be made about the current energy situation:

- The diesel generator is oversized considering the consumption of the site. Indeed, as illustrated in Figure 3, the average load is approximately 35kW and the maximum load is near 60kW. Thus, a 150kW generator is largely oversized;
- As a result of this mismatch, fuel consumption is very high (about 120 000 litres/seven months). Taking into account the high cost of fuel for remote sites, the annual fuel cost is an important issue for the camp (about \$ 175,000);
- The use of only one generator can also be a supply constraint in case of a failure. The current characteristics of the Esker's camp do not allow responding quickly and effectively to failure. Current emergency generator (6,5kW) is not sufficient;
- The equipment used is not necessarily suitable and its use is not always efficient and that leads to excess consumption.

Thus, the study should improve the camp energy situation (production and consumption) considering the geographical, financial and environmental constraints.

Improvement objectives

As resulting from energy data analysis, the objectives of the study are: 1) reduce the consumption of the camp; 2) design a new optimized energy production system to be installed. This study is done in two main steps:

- **Step 1: Energy efficiency and consumption reduction.** The purpose is to optimize the electric charge of the camp as the currently dissipated power is excessive. The objective is to reduce by nearly half the consumption, including the setting of more energy-efficient systems and adapted regulation;
- **Step 2: Implementation of a new electric generation system.** This new system should be adapted to the load and increase the use of renewable energy. In this study, the implementation of a wind-diesel hybrid system with compressed air storage will be studied and sized, using the abovementioned software [25].

The final objective is obviously a net reduction of fuel consumption and maintenance costs.

III. Electrical load of the camp with energy efficiency measures

To achieve an effective and relevant reduction in electric consumption of the camp, we need the real load profile over a complete operation period, one year. However, the only measured and available data are the extreme and average monthly load values and detailed load profile for one day (September 28th, 2014). We extrapolate these values considering similar daily profiles over the whole one year period and scale it based on monthly average and maximum values compared to annual ones. Details of the procedure are following.

Estimation of the load profile over one year period

The following assumptions are made to build the annual load profile:

- The daily load profile is the same for each day of the same month;

- The consumption profile is primarily driven by the use of heating (water heating included);
- The extrapolation between the monthly consumption is based on the monthly UDD (Unified Degree Day) of the site. It is a result of the previous hypothesis;
- We use the Schefferville UDD data and we consider that are approximately the same in Esker camp;
- The monthly profiles are the same from month to month, if their UDD are equivalents.

As mentioned through the hypotheses, the measured daily profile (day of September 28th, 2014) depends on the heating needs. Indeed, it is the biggest consumption source, about 1/3 of the total consumption of the site. The study of the monthly UDD highlights the heating needs of each month compared to site temperature. Thus, by comparing and analysing the UDD, we can consider similar months as highlighted in Table 1 (June-July-August; May-September-October; November).

Table 9: Monthly heating UDD comparison (Data: RetScreen[26])

Month	UDD
May	524
June	291
July	174
August	217
September	378
October	601
November	813

Thus, the annual consumption is studied based on three typical seasonal profiles: 1) spring and autumn (May-September-October); 2) summer (June-July-August); 3) beginning of winter (November). The load profile of September 28th 2014 is extrapolated for the whole corresponding season. To establish the load profile for the other two seasons, we adjust the heating needs between the seasons. The comparison shows 55% less consumption for the profile (2) compared to profile (1) and 60% increase for profile (3) compared to (2). The final annual load profile in the form of average monthly consumption of the camp is shown in Figure 4.

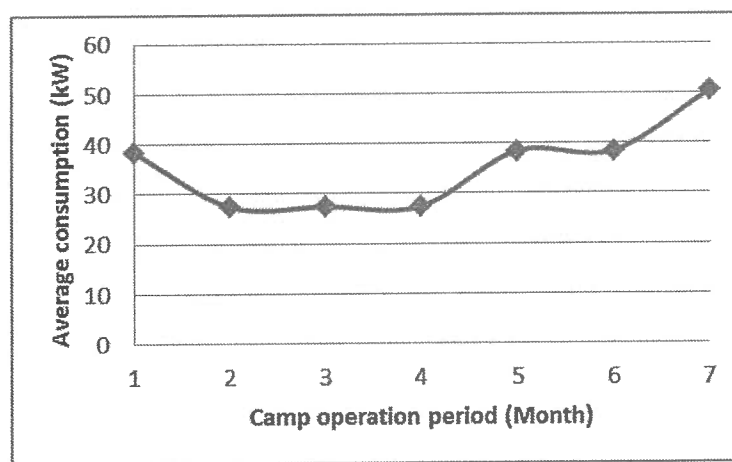


Figure 4: Current energy consumption profile established for the average annual consumption of Esker Camp

To assess the validity of the load profile, a simulation was performed with the WDCAS software taking into account the characteristics of the diesel generator currently used. Thus, the computed fuel consumption is 115 000 litres, that represents a difference of 4% compared to the real consumption data. This comparison confirms the validity of annual variation of the load.

Estimation of the annual load profile after energy efficiency measures

While the energy efficiency study in itself is not the object of this paper, the results are important to determine appropriate values of the charge. As mentioned, the largest electricity consumption is for buildings and water heating. The new energy profile used for the study of the WDCAS system to be implemented has to consider the reduction of the heating charge using more efficient equipment. Nevertheless, it is relevant to include other energy efficiency measures aimed to reduce fuel consumption:

- The operation control of all systems. Currently, many charges (heating, lighting, ventilation, etc.) operate even when it is not necessary;
- The installation of new efficient lighting systems (indoor and outdoor);
- The installation of more efficient equipment (heating, pumping station, etc.).

Even with the implementation of these recommendations, heating still the largest load in the overall electricity consumption of the camp. The energy efficiency study concludes that average load can be reduced at 25kW (compared to 35kW at present), with a peak-load of 45 kW (compared to 60kW now). Finally, the monthly average load variation after implementation of energy efficiency measures is represented at Figure 5.

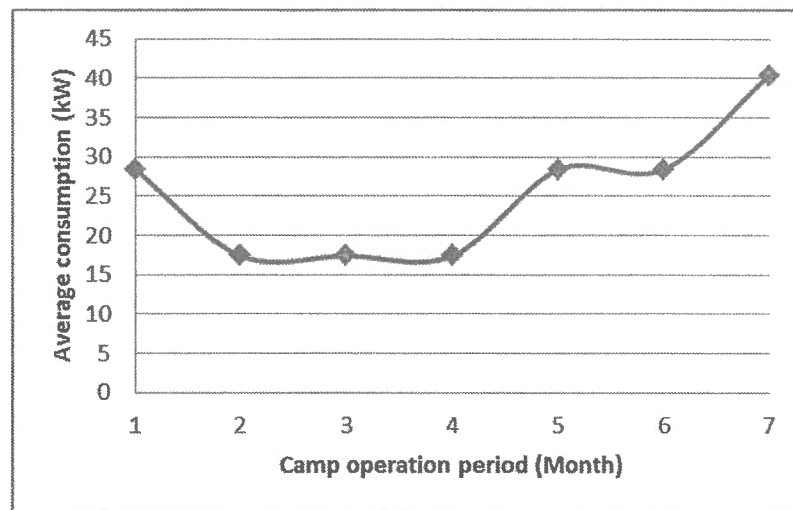


Figure 5: New energy consumption profile established for the average annual consumption of Esker Camp after implementation of energy efficiency measures

Table 2 summarizes the changes in the load profile after implementation of energy efficiency measures:

Table 10 : Comparison of load characteristic values before and after implementation of energy efficiency measures

Characteristics	New profile	Current profile
Ave. consumption	25,36 kW	35,36 kW
Max. consumption	47, 70 kW	57,70 kW
Min. consumption	13,80 kW	23,80 kW

Based on the new load profile we design a new wind-diesel hybrid system adapted to the site. The current 150kW generator is still largely oversized after implementation of energy efficiency measures.

IV. Modelling and sizing of production system

A wind-diesel hybrid system with compressed air storage (WDCAS) is considered to provide electricity to Esker Camp. The appropriateness of this technology has been proved in various studies for remote sites [9-11]. Specifically, the coupling of wind energy to a diesel generator appears as the most suitable alternative for local and remote applications and has already been the subject of various implementation works. Then, it was also shown that compressed air energy is a very suitable technical and economical storage solution for a wind-diesel hybrid system for remote areas [12]. To design this system, we used a software that has been specifically developed for WDCAS systems [25]. All results presented in this study are obtained using this software. Finally, in this study the emphasis is on technical and energetic aspects to improve fuel economy, the economic and logistic aspects are not considered and should be the subject of subsequent studies.

WDCAS features and model

The design of WDCAS depends of the site parameters and the wind power penetration rate (WPPR). However, the main components of a WDCAS are always the same, i.e. the initial energy source (diesel), the renewable energy source (wind) and the compression and storage system (compressor and reservoir) [27].

Currently, the performances of a WDCAS system have been determined at specific regimes and implementation scenarios (high or low penetration, high or low storage pressure, etc.) [21, 22, 25, 28, 29]. For each case, the sizing and calculations involved in the

design and performance analysis of such hybrid system have not integrated all possible optimization scenarios. By using the WDCAS software, we analyse the system operation over a complete one year period taking into account all parameters that will affect the system performance. In this context, it is now possible to consider all parameters of the sub-systems in the design and performance analysis of the WDCAS system. For example, the storage parameters affect significantly the system performances as shown in a previous work [30].

System model

The model used in the WDCAS software determines the performances like fuel consumption, operation frequency of each sub-system, etc. of the WDCAS system. Specific models are developed for each sub-system, i.e. wind turbines, diesel generator (and its overcharging) and compressed air storage (compressor, reservoir). In addition, various operation modes are implemented to account for specific objectives of the case study [25].

Through the duration of analysis and for each time step, the model runs respecting the following energy balance equation:

$$Load = WindTurbinePower + DieselGeneratorPower - PowerCompressedAirStorage$$

(1)

The solution to this equation uses physical modelling of the wind turbine, diesel generator and storage equipment.

Wind Turbine Power

The wind turbine power is determined, for each time step, based on the wind speed and turbine characteristics. Thus, the user has to know the wind speed data of the site

thanks to the form of Weibull parameters or average wind speed [13]. Moreover, with the wind turbine features, the model is able to determine the wind turbine power, depending of the following equation or using directly turbine's power curve:

$$P_{WT_d}(v_w) = \frac{1}{2} \rho_a C_p S_{WT} v_w^3 \quad (2)$$

A main characteristic of the system is the wind power penetration rate defined as the ratio of installed wind power capacity to maximum load:

$$WPPR = \frac{P_{max\ WT}}{P_{max\ CH}} \quad (3)$$

This parameter has a significant effect on the system performance [25].

Diesel Generator Power

The system model allows the use of one or more diesel generators operating in “normal mode” (without compressed air) and/or supercharged with stored compressed air. In this context, the software uses models presented in previous studies [31-33].

In normal operation, fuel consumption depends of the required power of diesel generator as resulting from Equation (1) and its technical characteristics. The software determines fuel consumption using the following relation with A and B, specific parameters to each diesel engine:

$$\dot{m}_{f_DE} = A \cdot P_{DE} - B \quad (4)$$

In supercharged mode, the stored compressed air is used such as to maintain an optimal air/fuel ratio (λ) corresponding to the maximal efficiency of diesel generator. Previous studies [35] demonstrated that maximum efficiency of the diesel engine

($\eta_{i_{DE}} \cong 56\%$) is reached for an air/fuel ratio of $\lambda \cong 53$. Therefore, the fuel rate and compressed air flow rate required to supercharge the diesel are determined from the following equation:

$$P_{DE} = PCI * \eta_{i_{DE}} * \frac{\dot{m}_{in_{DE}}}{\lambda} \quad (5)$$

Compressed air storage

The model of compressed air storage depends on both the compressor characteristics and the tank features.

- Compressor characteristics

The compressor determines how the excess of wind energy in the system, as resulting from application of Equation (1), is used. Subsystem modelling uses physical parameters related to air compression phenomena [35]. In order to ensure the correct operation of the WDCAS, the size of the compressor (i.e. power) must be determined. Thus, the relation between power and compression ratio of a polytropic compressor is defined by:

$$P_C = \frac{n_C N_C}{n_C - 1} * \dot{m}_C * R * T_{st} * \left[\left(\frac{p_{out}}{p_a} \right)^{\frac{n_C - 1}{n_C N_C}} - 1 \right] * \frac{1}{\eta_{p_C}} \quad (6)$$

Moreover, the compressor power can be determined as the wind power surplus adjusted by integrating the efficiencies of the electric motor of the compressor and of the mechanical transmission between this motor and the compressor. These efficiencies account for the losses observed in this equipment:

$$P_C = P_{EX_WT} * \eta_{tr} * \eta_e = (P_{WT} - P_{CH}) * \eta_{tr} * \eta_e \quad (7)$$

- Storage tank characteristics

To model this system, we introduce a parameter called the **storage unit**. It represents the quantity of compressed air coming out from the tank that is required to supercharge optimally the diesel generator such as to deliver a power equivalent to the average charge, during one time step (generally one hour). The storage unit is defined as follows:

$$\dot{m}_u = \frac{\lambda * P_{CH\ avg}}{\eta_{i_DE} * P_{CI}} \quad (8)$$

Based on the maximum number of units contained in the tank, the total volume of the storage tank can be defined as follow:

$$V_{st} = \frac{N_{max\ unit} * \dot{m}_u * R * T_{st}}{P_{st}} \quad (9)$$

Estimation of the wind potential on the Esker camp

Knowledge of the wind potential of a site is essential if we wish to install a wind power plant that effectively displaces diesel consumption. Currently, no wind measurements are available on Esker camp site. The "Canadian Wind Atlas" tool has been used to determine seasonal and monthly wind potential variation at Esker [36]. However, choosing Schefferville as a reference point, there are differences between the data of "Canadian Wind Atlas" and data from Environment Canada meteorological services [37]. An advantage of wind data from Environment Canada is that are available on smaller time scales as day or hour depending on the period.

We applied a correlation based on MCP method between the data measured in Shefferville and indications of the "Canadian Wind Atlas" both in Shefferville and at Esker Camp. The few wind data available at the camp have been used to determine an approximate shear coefficient. This method appeared to be the best solution as it allows to consider and to directly obtain hourly data as required by WDCAS software. Finally, the

wind characteristics and the annual wind speed profile at a height of 10 meters are presented in Table 3 and Figure 6, respectively.

Table 11 : Wind characteristics at the Esker camp

Characteristics	Values
Average wind speed (10m)	4,78 m/s
Shear coefficient	0,14

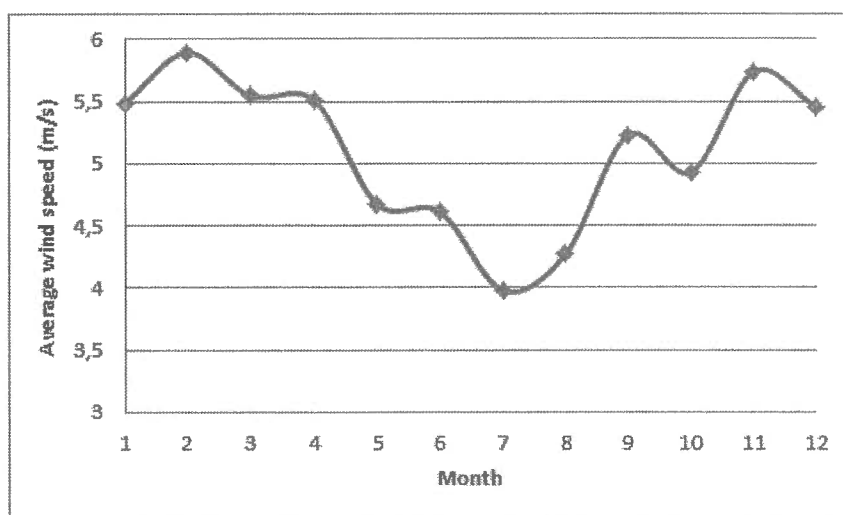


Figure 76: Monthly variation of average wind speed for Esker Camp

Based on wind speed and load profile, it is possible to design the appropriate WDCAS system for the Esker camp.

Choice of the wind turbine

The main data to determine wind power to be installed is the wind power penetration rate (WPPR). The WPPR is the ratio between the maximal wind power and the maximal load power. For this study, a medium scale system (average penetration) has been

studied, i.e. the installed capacity is around half the maximum load power. The target WPPR value has been set at 65%.

In order to determine the optimal system, we conducted a study on three types of wind turbines. Indeed, although the installed wind capacity has been defined, the choice of the model and the number of turbines may vary. To do this, we have analysed the characteristics of three wind turbine models that are most used for small or medium-scale applications. The comparison between these models has allowed choosing the best type of the wind turbine taking into account the different configurations. The three alternatives are presented in Table 4.

Table 12 : Choice of wind systems for the study

Wind turbine model (nominal capacity)	Number	Total power
Bergey BWC-S (10 kW)	4	40 kW
Endurance PGE-S343 (5 kW)	7	35 kW
Endurance PGE-S345 (35 kW)	1	35 kW

Figure 7 shows the total power curves of each wind turbine system. This feature can be relevant in the choice of the final system as it allows to observe the power produced by the wind turbine for a given wind speed.

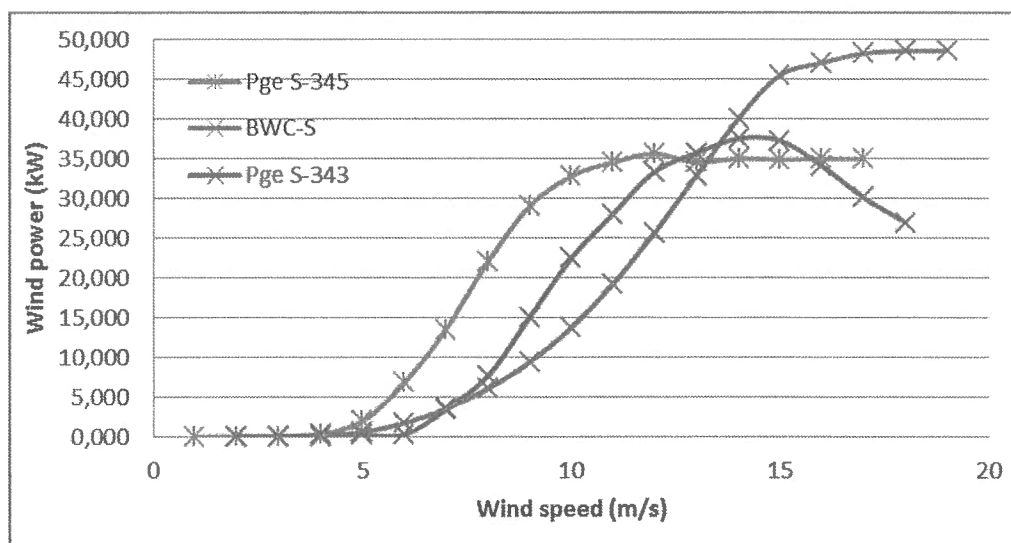


Figure 77: Total power curves of wind systems

In Figure 7 is noticed that, depending on wind speed, a system produces more or less power than another.

Choice of the diesel generator

As for the wind power system, the choice of the diesel generator is determined by maximum load. This is especially important as we have seen that the existing diesel generator on the camp is largely oversized compared to the load. We considered three different configurations, one of them being the non-optimal existing situation, a 150 kW Cummins model. This is mainly for comparison as we will be able to determine the eventual performance improvement of the hybrid system. The alternative solutions are Caterpillar generators models that we have already used in hybrid systems. Two different power capacities have been considered to determine the influence of the number of machines on overall performance. Table 5 below summarizes these choices.

Table 13 : Choice of generating systems selected for the study

Generator model	Number	Total power
-----------------	--------	-------------

(nominal capacity)		
Cummins D-160 (150 kW)	1	150 kW
Caterpillar D13-2 (12 kW)	4	48 kW
Caterpillar D30-8 (27 kW)	2	54 kW

Choice of the storage system

To define the storage system, we have established different configurations according to air storage pressure. In fact, the pressure affects the storage volume which is an important element in the design and installation of a WDCAS in a remote area. However, the choice of a storage system is based on a number of parameters such as the number of compression stages, polytropic efficiency, compressor motor performance, storage temperature and compressor power. In this study, these parameters are chosen based on optimal values from a previous study [30].

Three storage systems are considered with different storage pressures, i.e. 50 bars, 40 bars and 30 bars. Table 6 presents all the characteristics of the storage system studied.

Table 14 : Storage systems characteristics selected for study

Characteristics	Values
Number of stages	5
Storage pressure	30, 40 or 50 bars

Polytropic efficiency	80%
Motor efficiency	90%
Storage temperature	20°C
Compressor power	5 kW

Determination of the optimal configuration

Now that the different configurations for each subsystem are chosen (3 for each wind turbine, diesel and storage pressure) we determine the optimal configuration among the 27 alternatives. This is done in two steps. First, using the WDCAS software, we simulate each configuration to determine annual fuel consumption and dissipated energy of the system. Then, we use a decision matrix to highlight the best energetic and technological solution. Indeed, it is not sufficient to consider only fuel saving in choosing the best configuration, other criteria have been considered as system performance, flexibility of operation, security of supply and the complexity. The criteria are:

- Fuel economy ;
- Storage capacity ;
- Power distribution ;
- Impact of the failure of a diesel generator ;
- Impact of the failure of a wind turbine ;
- Dissipated energy ;
- Installation complexity.

In addition, a weight was assigned to each criterion according to its degree of importance. Indeed, although each criterion is important to ensure the effectiveness of the system, some parameters are more important than others, and these must be considered in the final choice. Thus, the weighting is determined based on the importance of the criterion

with respect to the overall system and the objectives and constraints established for the case study:

- The fuel economy is the most important criterion, as the primary purpose of the project is to reduce fuel consumption and operation costs. This is an important advantage if the proposed system allows reducing fuel consumption compared to the original system. Weighting: 0,275.
- The complexity of the system and the impact of a failure of a diesel generator are the second most important criteria. Indeed, given site remoteness, the system should not be too complex to ensure a quick and easy maintenance and the loss of a generator should have the least impact on the security of supply. Weighting: 0,225.
- The distribution of power between systems (generators and wind turbines) is positioned as the third most important criterion. This criterion considers the concept of security of supply as larger the power that can be divided between the systems, lesser the impact of losing one of them. However, care must be taken that the system is not too complex. Weighting: 0.1.
- For the same reasons, but less important, the impact of the failure of a wind turbine. Indeed, despite it can affect the efficiency of the system; the loss of a wind turbine does not affect the safety of the installation. Weighting: 0,075.
- Finally, the storage capacity and power dissipation are the least important criteria. Indeed, their influence will be more a logistical constraint. Weighting: 0.05.

In terms of assigning grades to each configuration for different criteria, we used the worst case as a reference. Thus, depending if it is a positive or negative criterion for the choice of the system, the note will be affected proportionally higher or lower than the reference. Finally, each configuration will get an overall score resulting in systems classification from best to worst. The decision matrix and the results of the analysis are presented in the following tables.

Table 15a: Decision matrix for selecting the optimal configuration for the Esker Camp (Part 1)

Criteria	Weighting	D160 - BWC - 50bar	D13 - BWC - 50bar	D30 - BWC - 50bar	D160 - S343 - 50bar	D13 - S343 - 50bar	D30 - S343 - 50bar	D160 - S345 - 50bar	D13 - S345 - 50bar	D30 - S345 - 50bar	D160 - BWC - 40bar	D13 - BWC - 40bar	D30 - BWC - 40bar	D160 - S343 - 40bar	D13 - S343 - 40bar
----------	-----------	-----------------------	----------------------	----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------	------------------------	-----------------------

Fuel economy	0,275	1	1,9	2,1	1,1	2	2,2	1,2	2,3	2,5	1	1,9	2,1	1,1	2
Storage capacity	0,05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Power distribution	0,1	0,4	0,8	0,5	0,6	1	0,8	0,3	0,6	0,4	0,4	0,8	0,5	0,6	1
Impact of the failure of a generator	0,225	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8
Impact of the failure of a wind turbine	0,075	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0	0	0	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
Dissipated power	0,05	8,5	1	4	11	1,1	3,2	5,1	1	1,8	8,5	1	4	11	1,1
Installation complexity	0,225	0,7	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	1	0,4	0,7	0,7	0,3	0,5	0,4	0,3
Total	1	0,994	0,991	1,130	1,102	1,045	1,119	0,876	1,053	1,111	1,014	1,003	1,145	1,123	1,0595
Rank		23	23	6	12	19	9	27	17	11	21	22	4	9	16

Table 16b: Decision matrix for selecting the optimal configuration for the Esker Camp (Part 2)

Criteria	Weighting	D30 - S343 - 40bar	D160 - S345 - 40bar	D13 - S345 - 40bar	D30 - S345 - 40bar	D160 - BWC - 30bar	D13 - BWC - 30bar	D30 - BWC - 30bar	D160 - S343 - 30bar	D13 - S343 - 30bar	D30 - S343 - 30bar	D160 - S345 - 30bar	D13 - S345 - 30bar	D30 - S345 - 30bar
Fuel economy	0,275	2,2	1,2	2,3	2,5	1,1	1,9	2,1	1,2	2	2,2	1,3	2,3	2,5
Storage capacity	0,05	1,2	1,2	1,2	1,2	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Powers distribution	0,1	0,8	0,3	0,6	0,4	0,4	0,8	0,5	0,6	1	0,8	0,3	0,6	0,4

Impact of the failure of a generator	0,225	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4	0	0,8	0,4
Impact of the failure of a wind turbine	0,075	0,9	0	0	0	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0	0	0
Dissipated power	0,05	3,2	5,1	1	1,8	8,5	1	4	11	1,1	3,2	5,1	1	1,8
Installation complexity	0,225	0,3	1	0,4	0,7	0,7	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	1	0,4	0,7
Total	1	1,134	0,899	1,067	1,126	1,051	1,026	1,168	1,162	1,083	1,157	0,941	1,090	1,151
Rank		6	26	15	6	17	20	1	2	14	2	25	13	4

To better illustrate the results, the best nine configurations based on performance index are shown in Figure 8. Calculated from the results of the decision matrix, the performance index is the ratio between the sum of the final scores for a configuration and the sum of the final scores for the best configuration.

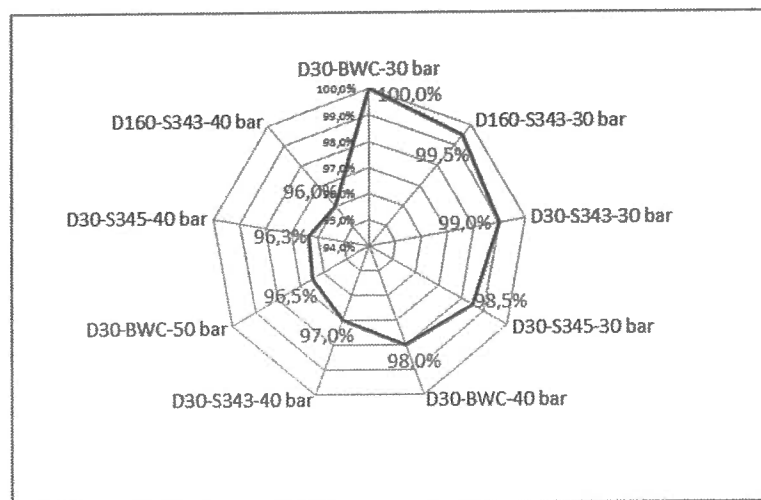


Figure 78: Variation of the performance index as a function of the configuration

From the decision matrix and the performance index, we conclude that the optimal configuration is the WDCAS using two 27 kW Caterpillar generators, four 10 kW Bergey wind turbines and a storage system with 30 bar air storage pressure. It is interesting that, as we mentioned before, the best solution is not necessarily the one with best fuel economy but the one with the best compromise between the various criteria.

We also note that among the nine best configurations, seven of them do not use the current diesel generator. Everything leads us to believe that implementation of a new system would be more appropriate.

In the various subsystems, the use of two generators of 27 kW seems most suitable for the implementation of the system, while the impact of the wind turbines on the choice is less important as the three alternatives are practically equally represented in the nine best solutions. With respect to the storage system, the choice of 30 bar air storage pressure seems most appropriate.

It is finally noted that differences between the best configurations are relatively low. This means that even when the financial and logistical criteria will be taken into account, the energy efficiency of the best solution (if different from our study) will be much the same.

For the optimal WDCAS we study in detail the performance improvement.

V. Performance of WDCAS system on the site

Based on the analysis in the previous section, the technical characteristics of the optimal configuration of the WDCAS system are presented in the Table 8:

Table 17 : Characteristics of the selected system

Number of compressor stages	5
-----------------------------	---

Polytropic exponent	1,3
Atmospheric pressure	1 bar
Storage temperature	20°C
Polytropic efficiency	80%
Compressor motor efficiency	90%
Minimum allowable power for storage	5 kW
Storage pressure	30 bars
Number of days of autonomy	1
Wind turbine	Bergey BWC Excel-S – 10 kW
Number of wind turbine	4
Total wind power	40 kW
Diesel generator	Caterpillar D30-8 – 27 kW
Number of diesel generator	2
Total generator power	54 kW

The operation of the system has been simulated over an entire one year period using WDCAS software [23]. Three different operation configurations have been simulated and compared to emphasize the impact of using the proposed WDCAS system. The first one, “Diesel only”, represents the present configuration with one 150kW diesel generator Cummins D-160. The second configuration, “Wind-Diesel System”, consists in the addition of 4 Bergey BWC Excel-S wind turbines (4*10kW) to the existing Cummins D-160 diesel generator. Finally, the complete “WDCAS” configuration uses diesel generators, wind

turbines and compressed air storage to provide energy as indicated in Table 8. The performance of the WDCAS system is compared with the other two alternatives and Figure 9 shows the main results concerning fuel consumption and the energy dissipated by each configuration of the system.

Results	
Minimal load	13,80 kw
Average load	25,36 kW
Maximal load	47,70 kw
Average wind speed	4,78 m/s
Only diesel consumption	112420 L
WDS diesel consumption	108901 L
WDCAS diesel consumption	35917 L

Dissipated energy	
	101038
Diesel only	kWh
WDS	12124 kWh
WDCAS	1352 kWh

Figure 9: Results for the fuel consumption and the dissipated energy of the system

The use of WDCAS results in a significant fuel consumption reduction of almost 76 500 litres per year, compared to the current system. We also note a large improvement when compared to the wind-diesel system without storage using the current diesel generator. These results highlight the technical interest and possible operation cost savings associated with the new WDCAS system. The effectiveness of the WDCAS system is confirmed by the very small value of the dissipated power when compared to the current system or a wind-diesel system. The dissipative load and associated costs are considerably reduced.

The figure 10 illustrates the fuel economies obtained using WDS and WDCAS systems compared with existing configuration.

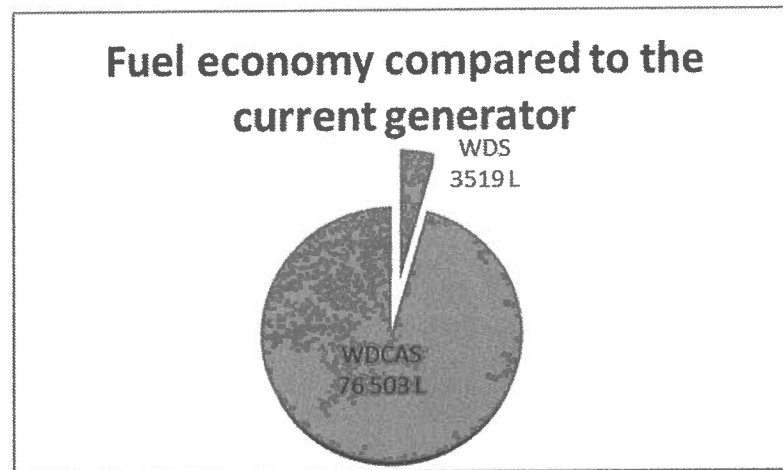


Figure 10: Fuel economy of WDCAS and WDS compared to the current system

Figure 11 shows in more detail the operation frequency of the diesel generators.

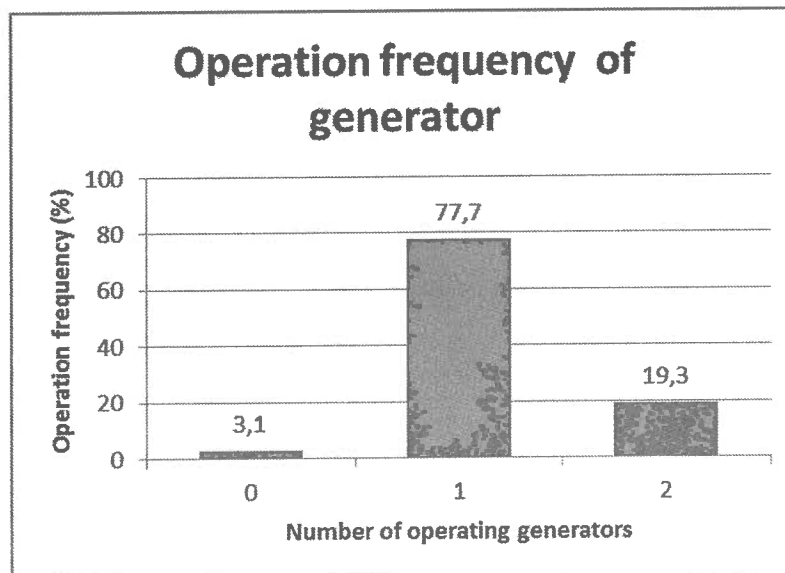


Figure 191: Operation frequency of WDCAS generators

First, it can be noted that for more than 3% of the time, no generator is operating. This is a direct consequence of the hybrid system in place. Then, only one generator works for about 78% of the time, which shows that the generator power is well adapted to supply

the average load. Finally, the two generators will operate simultaneously for 19% of the time, during periods of peak demand. In summary, it can be noted that over 80% of the time, the system is limited to use only one or no generator, reducing consequently the maintenance operations in particular. We can also presume that if a generator fails, it would be possible to supply energy to priority charges using only one generator during the repair period.

VI. Conclusion and perspectives

In light of the study that was carried out and the results obtained the installation of a wind-diesel hybrid system with compressed air storage for the Esker camp appears as a technically feasible solution from an energetic point of view. Analysis of several configurations and different parameters for each subsystem with regard to performance and operability criteria resulted in the choice of an optimized solution. The fuel consumption and overall efficiency of renewable energy use are significantly improved compared to existing solution.

Further studies should be conducted to ensure the financial viability of the project and logistic possibility for its implementation. However, thanks to the obtained results about the fuel saving and taking into account some security and management complexity elements, everything suggests that the relevance of installing a WDCAS will be confirmed.

Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support for conducting this research from FRQNT (Fonds de Recherche du Québec Nature et Technologies), MERN (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec) and from Tshiuetin Inc. through the Mining development program.

Bibliography

- [1] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Ramdenée D, Dimitrova M, Perron J, Adegnon M, Boulay D, Arbez C. Potential of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed air system for Nordic remote canadian areas. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):795-804.
- [2] Forcione A. Système jumelé éolien-diesel aux Îles-de-la-Madeleine (Cap-aux-Meules) - Etablissement de la VAN optimale. *Hydro Québec*; 2004.
- [3] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. *Rapport Technique*, Université du Québec à Rimouski, 2008.
- [4] Chauhan A, Saini RP. A review on Integrated Renewable Energy System based powergeneration for stand-alone applications: Configurations, storage, options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 38(2014):99-120.
- [5] YekiniSuberu M, MohdWazir M, Bashir N. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 35(2014):527-539.
- [6] Ibrahim H, Ghandour M, Dimitrova M, Ilinca A, Perron J. Integration of wind energy into electricity systems: technical challenges and actual solutions. *Energy Procedia* 2011; 6(2011):815-824.
- [7] Ma T, Yang H, Lu L. A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for remote island. *Applied Energy* 2014; 121(2014):149-158.
- [8] Bridier L, David M, Lauret P. Optimal design of a storage system coupled with intermittent. *Renewable Energy* 2014; 67(2014):2-9.

- [9] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Perron J. Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé. *Revue des énergies renouvelables* 2007; (2007):47-50
- [10] Ibrahim H. Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé. Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [11] Ibrahim H, Ilinca A, Rousse D, Dutil Y, Perron J. Analyse des systèmes de génération d'électricité pour les sites isolés basés sur l'utilisation du stockage d'air comprimé en hybridation avec un jumelage éolien-diesel. ConFrEGE, Montreal, 2012.
- [12] Weis TM, Ilinca A. The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada. *Renewable energy* 2008; 33(7):1544-57.
- [13] Weis TM, Ilinca A. Assessing the potential for wind power incentive for remote villages in Canada. *Energy Policy* 2010; 38(2010):5504-5511.
- [14] LeGourieres D. Les éoliennes: Théorie, conception et calcul pratique. Editions du Moulin Cadiou 2008.
- [15] Ibrahim, H, Dimitrova M, Rousse D, Ilinca A, Perron J. Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie: critères de choix du système de stockage. Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Saguenay, 2011.
- [16] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems - characteristics and comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews* 2008; 12(2008)1121-1250.
- [17] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance index. *Electrical Power Conference, EPC 2007, IEEE Canada*, pages: 393 – 398, 25-26 Oct. 2007.

- [18] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Solutions de stockage de l'énergie éolienne. Laboratoire de Recherche du Groupe Eolien, 2006.
- [19] T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, J. Perron – “Optimal Management of Compressed Air Energy Storage in a Hybrid Wind-Pneumatic-Diesel System for Remote Area's Power Generation”, *Energy*, vol. 84, pp. 267-278, 2015.
- [20] Martinez N, Ilinca A, Ibrahim M, Benchaabane Y, Ramdenec D, Rousse R. Daniel, Chandra A., Influence of Compressed Air Energy Storage Parameters on Wind-Diesel System Performance. *Energy* 2015; Submitted.
- [21] Ibrahim H, Dimitrova M, Ilinca A, Perron J. Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunications isolée. *EJEE* 2009; 12(2009):701-731.
- [22] El-Hajj M. Etude de cas de l'électrification d'un village nordique par un système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé à moyenne échelle. Université du Québec à Rimouski, 2009.
- [23] Basbous T. Etude de faisabilité d'un jumelage éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski, 2009.
- [24] Basbous T. Hybridation pneumatique d'un moteur Diesel en vue de son utilisation dans un Système Hybride Eolien-Diesel avec Stockage d'Energie sous forme d'Air Comprimé. Université du Québec à Chicoutimi, 2012.
- [25] Martinez N, Ilinca A, Ibrahim H, Benchaabane H., Simulation tool for a hybrid wind-diesel system with CAES. *Applied Energy* 2015; Submitted
- [26] RetScreen - Introduction à l'analyse de projets d'énergies propres. RNCAN. <http://www.etscreen.net/fr/home.php>

- [27] Ibrahim H, Younes R, Ilinca A, Dimitrova M, Perron J. Study and design of a hybrid wind-diesel-compressed air energy storage system for remote areas. *Applied Energy* 2010; 87(2010):1749-1762.
- [28] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for wind-diesel energy generation. *Energy* 2012; 38(2012):264-275.
- [29] Deck-Leger ZL. Contrôle d'un système de couplage éolien-diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [30] Martinez N, Ilinca A, Ibrahim H, Benchaabane H, Ramdenne D, Rousse D, Chanda A. Influence of Compressed Air Storage Parameters on Wind-Diesel System Performance. *Energy* 2015; Coming soon
- [31] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Moteur diesel suralimenté, bases et calculs, cycle réel, théorique et thermodynamique. Rapport Technique, Université du Québec à Rimouski; 2006.
- [32] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. A new hybrid pneumatic combustion engine to improve fuel consumption of wind-Diesel power system for non-interconnected areas. *Applied Energy* 2012; 96(2012):459-476.
- [33] Basbous T, Younes R, Ilinca A, Perron J. Required time response of a variable valve actuator equipping a hybrid pneumatic - combustion engine. *International journal of engine research* 2012; 5(2012):514-528.
- [34] Ibrahim H, Younes R, Basbous T, Ilinca A, Dimitrova M. Optimization of diesel engine performance for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage. *Energy* 2011; 36(2011):3079-3091.

- [35] Thierbaut G, Wieser P, Ilinca A, Ibrahim H. Réalisation d'un logiciel de simulation de système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé. Université du Québec à Rimouski; 2011.
- [36] Atlas éolien; <http://www.atlaseolien.ca/fr/index.php>
- [37] Environnement Canada. <https://www.ec.gc.ca/>

CHAPITRE 5

ÉLABORATION DE NOUVELLES STRATEGIES D'OPERATION

5.1 OBJECTIFS

Tel que mentionné dans l'introduction du mémoire, la mise en place et l'analyse des stratégies ou modes d'opération pour le SHEDAC n'a pas encore fait l'objet d'études très approfondies. En effet, tel que constaté à travers l'élaboration du logiciel de dimensionnement (Chapitre 2), le système peut fonctionner seulement sous deux modes d'opération. En effet, compte tenu des différentes méthodes de production (éolien, diesel normal ou suralimenté) et des méthodes de stockage (implication de l'éolien et/ou des génératrices diesel pour le stockage), deux modes d'opération ont été mis en place dictant, ainsi, le fonctionnement du système en fonction de la charge, de l'énergie disponible et de l'état du stockage. Ces stratégies dépendent, donc, desdits paramètres mais aussi des contraintes opérationnelles propres aux sous-systèmes comme obliger les génératrices diesel à ne pas fonctionner à une puissance inférieure à 30% de leur puissance nominale, afin de ne pas endommager leur performance.

Ainsi, parmi ces stratégies, la première privilégie l'énergie provenant des génératrices diesel pour couvrir la demande alors que la deuxième privilégie l'énergie éolienne. La différence entre ces deux modes d'opération se caractérise par la manière dont l'énergie éolienne est utilisée quand elle est disponible mais insuffisante pour répondre seule à la charge. Le premier mode stipule, alors, que cette énergie doit être utilisée uniquement pour le stockage, alors que le deuxième propose d'utiliser cette énergie pour alimenter la charge et d'utiliser les génératrices diesel pour combler la différence.

Bien que jusqu'à maintenant ces deux stratégies soient représentatives de la façon dont le système peut fonctionner, une étude plus approfondie des paramètres et des contraintes opérationnelles doit permettre de définir de nouveaux modes de fonctionnement visant à optimiser l'efficacité du système. En effet, les analyses paramétriques développées dans les Chapitres 3 et 4 ont d'ailleurs permis de montrer la sensibilité de l'efficacité du système face à la variation de certains de ses paramètres.

C'est pourquoi, ont été proposées trois nouvelles stratégies d'opération permettant, ainsi, d'améliorer l'efficacité technique et/ou énergétique du SHEDAC. Pour ce faire, est effectuée, tout d'abord, une analyse paramétrique des différents sous-systèmes afin de mettre en évidence les multiples possibilités et contraintes opérationnelles auxquelles le SHEDAC est soumis. Ainsi, seront proposés des paramètres particuliers sur lesquels de nouveaux modes d'opération pourront s'articuler. L'implantation et la simulation de ces stratégies, grâce au logiciel développé, permettent finalement d'analyser la pertinence des résultats obtenus.

5.2 ANALYSE PARAMETRIQUE

Les objectifs de cette analyse sont d'une part, de démontrer à quel point les performances du système sont dépendantes de ses différentes caractéristiques, et d'autre part, de mettre en évidence des idées d'optimisation qui pourront mener à l'élaboration de stratégies. Pour ce faire, l'influence de la ressource éolienne a été étudiée, à travers le TPP et la vitesse de vent, et des systèmes de production (éolienne et génératrice diesel). En effet, les précédents chapitres avaient permis d'avancer des premières conclusions sur l'effet de ces paramètres. De plus, l'influence des paramètres de stockage ne sera pas traitée dans ce chapitre puisque cette analyse a déjà fait l'objet d'une étude approfondie dans le Chapitre 3.

Afin d'harmoniser cette analyse avec celle visant l'optimisation du stockage, présentée dans le Chapitre 3, il a été décidé de reprendre les mêmes caractéristiques pour le cas étudié ici.

Les paramètres étudiés dans cette étude sont alors :

- Le TPP qui représente la part de puissance éolienne par rapport à la puissance maximale de la charge ;
- La vitesse moyenne du vent ;
- Le modèle (et le nombre correspondant) de l'éolienne. Dans ce cas-ci, sera considérée une charge maximale de 75kW et un TPP de 100% afin de prendre en compte un nombre significatif de modèles d'éolienne ;
- Le modèle (et le nombre) de génératrices diesel ;
- Le rapport air/fuel nécessaire au fonctionnement du moteur de la génératrice.

Enfin, l'analyse a été réalisée en observant l'influence de ces paramètres sur la consommation de diesel, excepté pour le rapport air/fuel où un regard est porté sur le rendement de la génératrice.

5.2.1. Influence du TPP

Il peut être remarqué sur la Figure 5.1. ci-après que, pour une vitesse de vent moyenne donnée, la consommation de diesel est inversement proportionnelle au taux de pénétration en puissance éolienne. Ainsi, plus le TPP augmente (donc le nombre d'éoliennes), plus la consommation diminue. Par exemple, le passage d'un TPP de 20% à 30% (passage de 1 à 2 éoliennes) permet une économie de carburant de 8,5%. Cette observation va ainsi dans le sens des conclusions présentées aux Chapitres 2 et 3. Il est également important de noter que les paliers observables sur la figure indiquent que le passage d'un TPP à un autre ne correspond pas forcément à un changement du nombre d'éoliennes. En effet, puisqu'il s'agit d'un pourcentage de puissance éolienne par rapport à

la charge totale, il se peut que l'augmentation du TPP ne soit pas suffisante pour impliquer l'ajout d'une éolienne. Par exemple, le passage d'un TPP de 10% à 20% ne permet pas l'ajout d'une éolienne, c'est pourquoi la consommation de diesel reste identique.

Cependant, il faut noter que l'ajout d'une éolienne amène également un coût. Le choix du TPP et la connaissance de la consommation de diesel associée important, donc, afin de savoir si les économies réalisées permettent d'amortir l'ajout d'une ou plusieurs éoliennes. Il peut, être, alors affirmé que le choix de la puissance installée est une contrainte technico-économique essentielle.

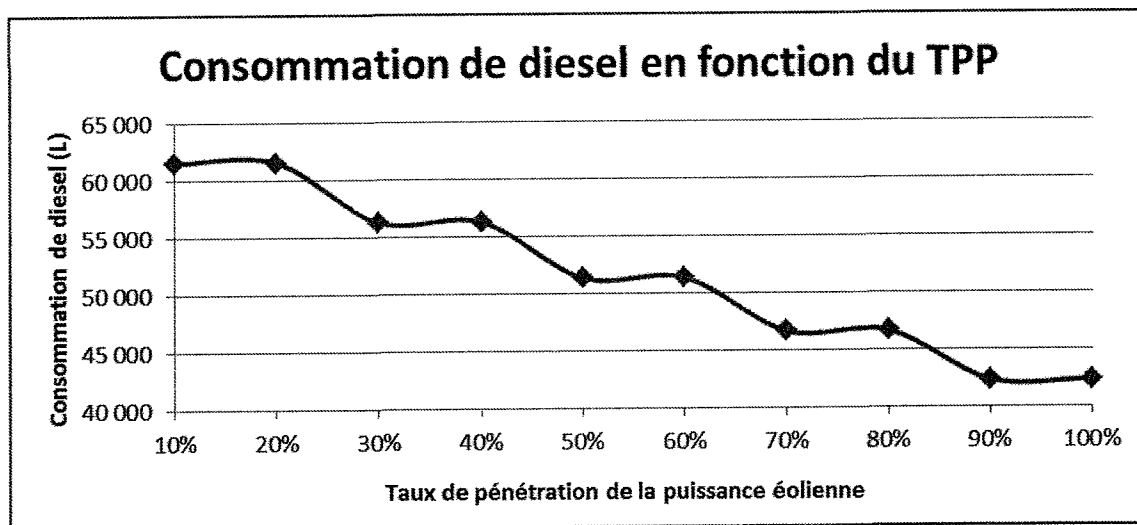


Figure 5.1 : Influence du TPP sur la consommation de diesel du SHEDAC

5.2.2. Influence de la vitesse de vent

Il peut être remarqué sur la Figure 5.2. ci-dessous que plus la vitesse moyenne du vent est importante, plus la consommation de diesel est faible. Cependant, il peut, être, également noté qu'en-dessous d'un certain seuil et au-dessus d'un autre, la variation de consommation n'est pas autant significative. Cela peut notamment s'expliquer par la plage de fonctionnement de l'éolienne qui ne démarre et ne s'arrête qu'à des vitesses de vent

spécifiques. Dans ce cas ci, un passage de la vitesse de 5,1 m/s à 6,38 m/s permet une économie de 33,8% (pour un TPP de 100%). Cela représente, ainsi, une très forte économie alors que la différence de vitesse de vent « n'est que de 1,28 m/s ».

Il peut, donc, en être déduit que la vitesse du vent moyenne est un facteur très influent sur la consommation de diesel. On peut même dire que le choix du site pour son potentiel éolien est un des plus importants pour l'implantation d'un SHEDAC. On peut d'ores et déjà penser que le choix entre une stratégie d'opération et une autre se fera en fonction de la ressource éolienne exploitable. Une telle conclusion va d'ailleurs dans le sens d'une étude qui avait déjà été réalisée, il y a quelques années [12].

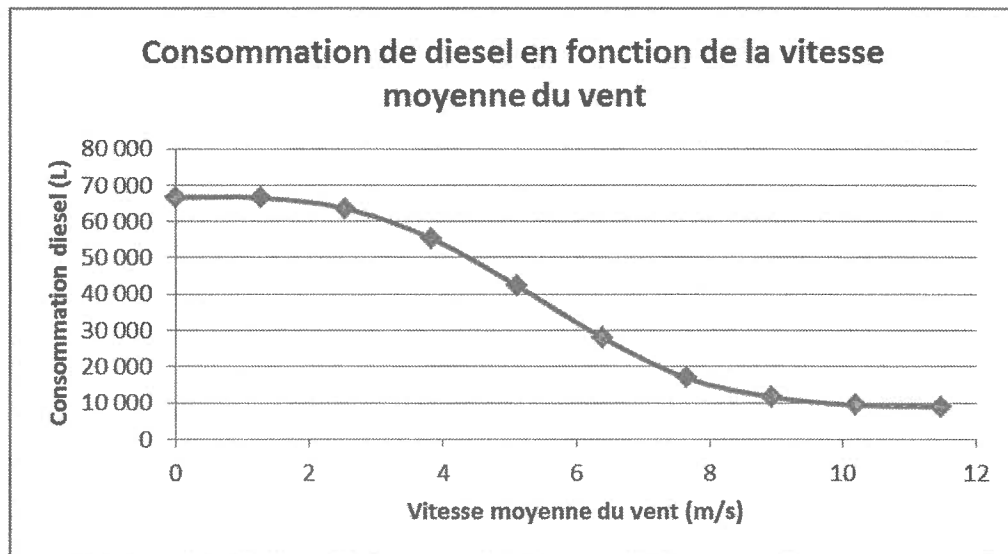


Figure 5.2 : Influence de la vitesse du vent sur la consommation de diesel du SHEDAC

5.2.3. Influence du modèle et du nombre d'éoliennes

À travers le Tableau 5.1. ci-après, il peut être remarqué que, pour une même puissance éolienne totale, la consommation de diesel n'est pas forcément la même selon le modèle d'éolienne. Par exemple, avec 75 éoliennes BWC-XL de 1 kW la consommation

est réduite de 14,1% comparé au cas où 10 éoliennes de BWC-R de 7,5 kW sont utilisées. Cela confirme l'importance du choix du modèle de l'éolienne du point de vue énergétique.

Considérant ces résultats, il peut en être déduit que le choix d'une stratégie d'opération pourra être privilégié par rapport à un autre selon le modèle d'éolienne étant donné que la répercussion sur les performances du système ne sera pas forcément la même pour une même puissance installée.

Tableau 5.1 : Influence du modèle et du nombre d'éoliennes sur la consommation de diesel du SHEDAC

Modèle de l'éolienne	Puissance totale (kW)	Consommation diesel (L)
Bergey BWC-XL (x75)	75	50 141
Bergey BWC-R (x10)	75	58 401
Bergey BWC-S (x8)	80	59 993
Endurance Pge S-250 (x15)	75	81 584
Endurance Pge S-343 (x15)	75	50 131
Endurance Pge S-343 (x3)	105	26 021
Endurance Pge E-3120 (x2)	100	34 730
Nothern NW 100 21-30m (x1)	100	48 648
Wind Energy Wes 18-18m (x1)	80	61 853

5.2.4. Influence du modèle et du nombre de génératrices

D'après le Tableau 5.2. ci-dessous, les conclusions obtenues, pour l'influence des génératrices, sont similaires à celles pour les éoliennes. En effet, pour une puissance installée identique, la consommation de diesel n'est pas nécessairement la même, dépendamment du nombre et du modèle de la génératrice. Tout comme pour les éoliennes, le choix du modèle de génératrice a donc une influence non négligeable sur les performances du système.

Étant donné que la génératrice diesel est un élément central du SHEDAC, notamment à cause du processus de la suralimentation, on peut donc penser qu'une stratégie dépendant de son fonctionnement pourrait en découler.

Tableau 5.2 : Influence du modèle et du nombre de génératrices sur la consommation de diesel du SHEDAC

Modèle de la génératrice	Puissance totale (kW)	Consommation diesel (L)
Caterpillar D13-2S (x5)	59	42242
Caterpillar D13-2 (x5)	60	42 341
Caterpillar D20-4 (x3)	54	40 434
Caterpillar D25-6S (x3)	67,5	40 802
Caterpillar D25-6 (x3)	68,4	40 022
Caterpillar D30-8 (x2)	54	39 502
Caterpillar D40-4 (x2)	72	36 987
Caterpillar D40-4S (x2)	72	38 734

Perkins D60P4S (x1)	54	16 947
Perkins D75P3 (x1)	68	20 617
Perkins D80P4 (x1)	72	22 069

5.2.5. Influence du rapport air/fuel

La Figure 5.3. montre qu'il existe effectivement un rendement optimal pour le moteur qui dépend de la valeur du rapport air/fuel. Ce rendement est, alors, de 56% pour un rapport air/fuel d'environ 53. Il peut être remarqué qu'avant et après cette valeur, le rendement se dégrade à cause de différentes pertes ou contraintes dans le moteur. Actuellement, l'utilisation de l'air comprimé est gérée de façon à permettre la suralimentation du moteur, tout en respectant ce rendement optimal.

Malgré ces observations, il est néanmoins possible de se demander si d'autres stratégies de suralimentation ne pourraient pas être mises en place tel que présenté dans plusieurs études [11, 38, 39].

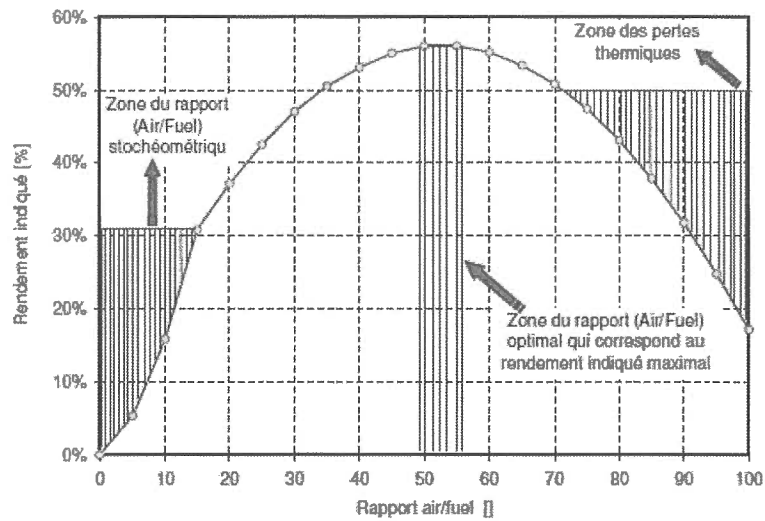


Figure 5.3 : Influence du rapport air/fuel sur la consommation de diesel du SHEDAC [3, 33, 39, 40]

5.3 ÉLABORATION DES STRATEGIES D'OPERATION

Avant de procéder à l'implantation de nouvelles stratégies d'opération, il serait nécessaire d'établir des caractéristiques autour desquelles ces stratégies devront être modélisées. Deux types de caractéristiques peuvent, alors, être définis : les paramètres variables et les contraintes opérationnelles. Un paramètre variable représente une caractéristique dont sa variabilité et son influence pourront avoir un impact sur l'efficacité du système. Une contrainte opérationnelle est une caractéristique basée sur le fonctionnement complet d'un sous-système. Ces caractéristiques peuvent, alors, être considérées individuellement ou couplées afin d'établir une nouvelle stratégie.

5.3.1. Paramètres variables du système

Une liste (non exhaustive) des paramètres qui, si leurs valeurs varient, peuvent avoir un impact sur les performances du système, est présentée ci-dessous :

- **Taux de Contribution de la Puissance Pneumatique (CPP) ou Rapport air/fuel** : Tel que vu précédemment, ce paramètre représente la quantité d'air injecté dans le moteur par rapport à celle de carburant ;
- **Seuil de puissance pour la suralimentation** : Il représente le pourcentage de la puissance nominale de la génératrice à partir duquel la suralimentation est mise en œuvre. Par exemple, on pourrait choisir de ne pas suralimenter la génératrice tant qu'elle ne dépasse pas 70% de sa puissance nominale ;
- **Réserve de puissance pour la puissance éolienne** : Elle représente le seuil à partir duquel, on estime que les éoliennes peuvent assurer la demande sans changement brusque de production.

5.3.2. *Contraintes opérationnelles*

Une liste (non exhaustive) des contraintes sous lesquelles le système peut être amené à fonctionner est présentée ci-dessous. Ainsi, elles peuvent dépendre à la fois d'éléments extérieurs ou intérieurs au système :

- **Génératrice en fonctionnement permanent** : Même si la puissance éolienne est suffisante pour approvisionner la charge, une génératrice peut rester fonctionnelle en permanence pour pallier à toutes interruptions brusques des éoliennes ;
- **Distribution des charges des génératrices** : Dans le cas où le système se compose de plusieurs génératrices, et selon la puissance nécessaire, le système distribue les charges sur plusieurs génératrices plutôt que de fonctionner avec une seule ;
- **Gestion de la réserve d'air comprimé** : il est important de définir la façon et le moment de l'utilisation de l'air comprimé pour la suralimentation. Il s'agirait, alors, de trouver une alternative à la gestion déjà mise en place pour éviter notamment les

risques d'avoir le réservoir plein pendant trop longtemps (mais sans avoir à l'agrandir).

5.3.3. Mise en place de stratégies d'opération

Il existe, donc, différents paramètres et contraintes qui peuvent faire l'objet de la création d'une stratégie d'opération. De plus, certains paramètres sont étroitement liés à des fonctionnements dus aux contraintes opérationnelles. Il est proposé, alors, de regrouper ces caractéristiques pour élaborer de nouvelles stratégies :

- **Stratégie de sécurité** : En associant le paramètre de réserve de puissance et la contrainte obligeant le fonctionnement d'une génératrice en permanence, on propose une stratégie dite de sécurité. Ainsi, le système peut assurer l'approvisionnement de la charge en tout temps et élimine, ainsi, l'incertitude liée à une éventuelle chute brutale de la puissance éolienne. De plus, la présence d'une génératrice, même si elle n'est pas nécessaire d'un point de vue énergétique, peut servir de régulateur de fréquence et de tension du réseau ;
- **Stratégie de gestion optimale de la réserve d'air** : En associant le paramètre du rapport air/fuel et la contrainte de gestion d'air, de nouvelles stratégies sur la gestion optimale de la réserve d'air peuvent être mises en place. Par rapport à celle déjà existante, il s'agit ici, de créer de nouvelles alternatives qui s'adapteront à tel ou tel système.

Une stratégie directement issue d'une contrainte opérationnelle est, ensuite, proposée :

- **Stratégie de distribution des charges des génératrices** : Compte tenu du fonctionnement propre à chaque génératrice (tel qu'observé dans l'analyse paramétrique précédente), il est possible qu'il soit plus efficace pour le système de partager la demande de la charge entre plusieurs génératrices plutôt que d'en utiliser

une seule. L'efficacité de cette stratégie sera, alors, dépendante du système mis en place.

Dans la suite, chaque stratégie sera modélisée, implantée et simulée, indépendamment, grâce au logiciel développé au Chapitre 2. L'objectif étant d'analyser leur impact sur l'efficacité du système et d'en déterminer dans quelles circonstances elles pourront être utilisées.

5.4 ÉTUDE DE LA STRATEGIE DE SECURITE

5.4.1. *Intérêt de la stratégie*

Tel qu'entrevu lors de la présentation du SHEDAC, le fonctionnement actuel du système considère que lorsque la puissance éolienne est supérieure ou égale à la charge, seules les éoliennes fonctionnent (les génératrices diesel sont arrêtées). Dans le cas contraire, il est obligatoire qu'au moins une génératrice soit en marche pour combler le déficit de puissance. Le basculement entre un mode de production (tout éolien) et un autre (éolien + diesel) doit alors être instantané afin d'assurer un approvisionnement sans interruption d'alimentation de la charge.

Néanmoins, la ressource éolienne est considérée comme instable, difficilement prévisible à petite échelle et pouvant ainsi provoquer de grandes fluctuations sur de courtes durées. Ce type de variations se répercute, alors, sur la production des éoliennes. Ainsi, cette méthode de fonctionnement semble incompatible avec la stabilité recherchée pour l'alimentation de la charge. C'est pourquoi, le système actuellement modélisé considère que les génératrices diesel interviennent immédiatement dès que la puissance éolienne devient insuffisante, et inversement dès que cette puissance est suffisante. Bien que d'un point de vue théorique, ce mode opératoire se présente comme un scénario idéal, ceci devient, dans la réalité, problématique puisque plusieurs risques peuvent subvenir :

- D'une part, en ce qui concerne le temps de réponse pour assurer l'approvisionnement, la phase de mise en route d'une génératrice diesel est nécessairement plus longue que celle pour pallier au changement instantané de mode de production ;
- D'autre part, le réseau doit être assuré d'une certaine stabilité en fréquence et en tension. Ainsi, plus le nombre de sources de production est important, plus la régulation du réseau se complexifie. D'un autre côté, plus la transition entre deux modes de production est fréquente, plus les risques d'instabilité s'intensifient. En général, les génératrices diesel ne causent pas un réel problème pour la stabilité du réseau car ce sont des machines dotées d'un régulateur de tension et d'un gouverneur de vitesse capable de réguler, facilement, la fréquence en agissant seulement sur l'injection de carburant. Par contre, dans le cas des éoliennes, la régulation de la fréquence et de la tension est plus complexe et pourrait nécessiter des dispositifs supplémentaires issus de l'électronique de puissance en fonction du type de la machine électrique l'éolienne utilisée (synchrone ou asynchrone). Il s'agit, alors, de l'ajout d'un compensateur de puissance réactive ou de convertisseurs de puissance.

C'est, donc, pour ces raisons qu'une stratégie visant un fonctionnement plus sécuritaire pour le système et pour le réseau paraît très intéressante.

5.4.2. Solutions envisageables

D'après les problématiques précédentes, la solution à envisager devra répondre à deux critères :

- **Imposer une réserve de puissance** : Cette réserve doit être en mesure d'assurer la continuité de l'approvisionnement de la charge, même si, soudainement, le système

éolien ne peut plus l'assurer. Grâce à cela, il n'y aura, alors, plus de risques de pénuries d'approvisionnement ;

- **Assurer la stabilité du réseau en tout temps** : Selon le type d'éolienne installée, la transition abrupte d'un mode de production à un autre peut être nuisible pour le réseau. La solution mise en place doit, alors, pallier également à ce problème.

Si l'on observe chacun de ces critères séparément, différentes solutions peuvent être envisagées :

- Pour ce qui concerne la réserver de puissance, différents systèmes peuvent être utilisés pour assurer un besoin d'approvisionnement soudain. Ainsi, les méthodes les plus souvent utilisées sont les systèmes de stockage tels que les batteries permettant de restituer de l'énergie électrique dès que nécessaire. De plus, des systèmes auxiliaires de production peuvent, aussi, être utilisés dans la mesure où ils fonctionnent en même temps que les éoliennes. Cependant, pour ne pas être confronté au même problème qu'avec l'éolien, il faut que le système dépende d'une source fiable et continue. Des machines conventionnelles telles qu'une génératrice diesel doivent alors être privilégiées ;
- Pour ce qui concerne la stabilité du réseau, il est nécessaire de coupler l'éolienne avec un autre système qui s'occupera d'assurer la régulation du signal de sortie. Pour ce faire, différentes possibilités sont offertes. Par exemple, l'utilisation de systèmes issus de l'électronique de puissance tels qu'un convertisseur de puissance ou un compensateur de puissance réactive. Il s'agit bien souvent de systèmes spécifiquement conçus pour ce type de régulation. Une autre façon de procéder est d'utiliser des machines capables d'assurer une mise à niveau entre la sortie des systèmes producteurs et l'entrée du réseau. Même s'il ne s'agit pas de sa fonction première, une génératrice diesel peut, alors, être utilisée pour une telle fin.

Plusieurs dispositifs existants ont été proposés pour répondre aux exigences de ces deux critères. Cependant, pour des raisons économiques et logistiques, l'idéal serait de

choisir une seule configuration qui répond à l'ensemble des contraintes. Ainsi, d'après l'analyse précédente, la solution qui convient le mieux est l'utilisation d'une génératrice qui fait déjà partie de l'installation présente sur le site. Se servir d'une génératrice existante présente, donc, deux avantages prépondérants :

- Minimisation des coûts : Étant déjà en place, l'utilisation de la génératrice n'engendrera aucun frais d'achat ou de transport supplémentaire. Il faudra, par contre, considérer les frais de consommation de diesel associés au fonctionnement additionnel. Cependant, si l'on considère l'usage de l'air comprimé pour stocker l'énergie en surplus et pour suralimenter la génératrice, ces frais seront amortis ;
- Minimisation de l'espace : L'utilisation dérivée d'une génératrice évitera l'ajout d'un système supplémentaire dans une zone souvent restreinte en site isolé.

En considérant la nature spécifique des projets associés à l'installation d'un SHEDAC, la considération des deux points précédents est capitale dans une démarche d'optimisation. Le Tableau 5.3. récapitule les solutions présentées en y indiquant leurs avantages et inconvénients.

Tableau 5.3 : Comparaison des solutions envisagées pour répondre à la problématique de sécurité du système

	Solutions possibles			
	Batteries		Génératrice Diesel	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
	Restitution rapide d'énergie	Nécessite de l'espace supplémentaire	Assurance d'un approvisionnement constant	Légère augmentation de la consommation de carburant
Assurer une réserve de puissance	Système de stockage additionnel	Nécessite des sous-systèmes supplémentaires (ex: onduleur)	Limitation du nombre de démarrages/arrêts de la machine	

		Augmentation importante des coûts de l'installation	Système déjà présent dans l'installation	
Assurer la stabilité du réseau	Électronique de puissance		Génératrice Diesel	
	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
	Système spécialement conçu pour ce type d'action	Nécessite de l'espace supplémentaire	Compenser l'instabilité du réseau causée par les éoliennes	Légère augmentation de la consommation de carburant
	Technologie développée efficacement par de grands industriels (ex: Alstom)	Complexification technique importante de l'installation	Limitation du nombre de démarrages/arrêts de la machine	
		Augmentation importante des coûts de l'installation	Système déjà présent dans l'installation	

5.4.3. Implantation, simulation et analyse de la stratégie

L'implantation de la solution retenue se présente, donc, comme le développement d'une nouvelle stratégie d'opération. En effet, imposer cette nouvelle contrainte opérationnelle à l'installation a pour conséquence d'influencer directement les performances du système. Cette nouvelle stratégie dite de sécurité (d'approvisionnement et de stabilité) tient, ainsi, compte de l'utilisation d'une génératrice en tout temps, même si la puissance de l'éolienne est suffisante pour alimenter la charge.

Afin d'implémenter et modéliser cette nouvelle stratégie dans le logiciel de dimensionnement, seront considérées, alors, les nouvelles contraintes opérationnelles tout en tenant compte des contraintes déjà présentes dans le fonctionnement du système. Un algorithme représentant ce fonctionnement a ainsi été mis en place (voir Annexe I). De plus, la simulation est réalisée pour le cas d'étude considérée en début de chapitre.

Cependant, celle-ci se fera pour deux niveaux de TPP (40% et 100%) puisqu'il a été constaté l'importance de ce facteur et comment il impacte fortement les performances du système. Le Tableau 5.4. présente, alors, les résultats obtenus en comparant le système avec la nouvelle stratégie par rapport au système de base.

Tableau 5.4 : Résultats des simulations pour le système avec stratégie de sécurité et le système de base

	Faible TPP: 40%		Haut TPP: 100%	
	Système initial	Système avec stratégie	Système initial	Système avec stratégie
Consommation en Diesel	56278 L	56347 L	42833 L	43693 L
Temps de fonctionnement de la génératrice en mode normal et à 30% de sa puissance nominale	3020 h	3060 h	2361 h	2602 h
Temps de fonctionnement de la génératrice en mode suralimenté et à 30% de sa puissance nominale	2224 h	2263 h	2008 h	2751 h

En analysant, premièrement, le cas avec un faible TPP (40%), une légère augmentation de la consommation en carburant de 69 litres, soit 0,1%, peut être facilement observée. Cela est, donc, dérisoire par rapport à la consommation totale et compte tenu du bénéfice qu'apporte l'ajout du fonctionnement de la génératrice en tout temps. De plus, en ce qui concerne le temps de fonctionnement de la génératrice, une augmentation de 40 heures (1,3%) pour son mode normal et de 39 heures (1,7%) pour son mode suralimenté peut être remarquée. Cela signifie que le système fonctionne comme souhaité puisque les temps de fonctionnement augmentent peu importe le mode, dépendamment de la réserve d'air disponible pour la suralimentation.

Dans le cas d'un fort TPP (100%), une augmentation plus importante de la consommation diesel peut être observée, soit 830 litres (1,96%). Néanmoins, tout porte à croire, aussi, que cette augmentation est négligeable par rapport aux bénéfices apportés par la stratégie. Pour ce qui est des temps de fonctionnement, l'augmentation est beaucoup plus importante par rapport au système de base. En effet, pour le mode normal, une hausse de 241 heures (9,3%) est observée et de 743 heures (27%) pour le mode suralimenté. Il peut en être déduit, donc, que la génératrice a fonctionné beaucoup plus souvent en mode suralimenté. Cela s'explique par la présence du fort TPP qui permet de produire et stocker davantage d'air comprimé et donc de s'en servir pour suralimenter fréquemment les génératrices diesel.

5.4.4. Conclusions sur les bénéfices de la stratégie

Manifestement, l'implémentation de cette stratégie présente divers avantages en fonction du taux de pénétration en puissance éolienne. Ainsi, dans le cas d'un faible TPP, l'ajout de la génératrice permet d'assurer la stabilité et la sécurité du réseau sans avoir d'impacts néfastes sur les performances générales du système.

Lorsque l'on passe à un fort TPP, d'autres avantages se présentent. En effet, l'apport d'un fort TPP permet un plus grand apport de puissance pour le stockage et, donc, pour la suralimentation. Ainsi, grâce à cette plus grande réserve d'air, les possibilités de suralimentation sont plus grandes, notamment, dans le cas où l'on impose à la génératrice de fonctionner continuellement.

Bien que ces conclusions dépendent du présent cas d'étude, l'implémentation de cette nouvelle stratégie pour le SHEDAC en site isolé semble tout à fait pertinente.

5.5 ÉTUDE DE LA STRATEGIE DE DISTRIBUTION DES CHARGES DES GENERATRICES

5.5.1. *Intérêt de la stratégie*

Actuellement, le dimensionnement d'un SHEDAC est réalisé en considérant que, si plusieurs génératrices sont installées, ces dernières sont identiques (même modèle, même puissance). Le choix de la puissance d'une unité et le nombre d'unités dépendent, évidemment, des caractéristiques du cas d'étude. En général, outre le critère technico-économique, le choix des génératrices à installer se fait en fonction de deux critères : la réactivité du système face à une panne et l'espace disponible sur le site.

Dans le premier cas, il est recommandé, alors, d'installer au moins deux génératrices afin que, dans le cas où une serait hors service, le système, bien qu'affaibli, puisse assurer un niveau minimum d'approvisionnement. Plusieurs petites génératrices seront, alors, favorisées aux dépens d'une seule plus puissante. Ce critère a d'ailleurs été pris en compte dans l'étude proposée dans le chapitre 4. Dans le deuxième cas, un projet est souvent contraint à une limite spatiale. L'usage d'une seule génératrice est, alors, favorisée.

Finalement, les deux cas présentent leurs propres avantages et inconvénients. Cependant, dans les deux situations, la méthode actuelle implique l'usage d'un modèle unique de génératrice, quel que soit le nombre installé. Ceci présente d'ailleurs un avantage en termes de maintenance puisque le technicien associé n'aura besoin de connaître le fonctionnement que d'un seul type de génératrice.

Néanmoins, il est possible de remettre en cause cette logique de fonctionnement. En effet, différentes problématiques peuvent se présenter. Premièrement, la simple multiplication d'unités identiques provoque souvent un surdimensionnement de la puissance installée. En effet, la limitation du panel de génératrices existantes ne permet pas toujours d'atteindre parfaitement la même puissance (maximale) que celle à approvisionner. D'un point de vue technico-économique, cette configuration n'est donc pas optimale. Deuxièmement, en tenant compte de la contrainte liée à la limite minimale

d'opération des génératrices fixée à 30% de leur puissance nominale, le dispositif actuel entraîne bien souvent des surconsommations et des dissipations de puissance aberrantes. Effectivement, l'algorithme actuel de fonctionnement impose au système une répartition simplement additionnelle des génératrices. Par exemple, dans le cas d'un système composé de deux génératrices de 12 kW, si la charge est de 13 kW, la première génératrice devra fournir 12 kW alors que la deuxième sera utilisée pour combler le kilowatt restant (on considère ici que la puissance éolienne est nulle). Or, considérant la contrainte d'opération énoncée plus haut, la deuxième génératrice sera en fait obligée de produire 3,6 kW. Il en résulte, alors, une production inutile de 2,6 kW. Malgré la présence du système de stockage, ce mode opératoire n'est donc pas optimal. Ainsi, un problème de flexibilité et de synchronisation entre les génératrices peut être observé pour répondre efficacement à la demande. C'est pourquoi, une nouvelle stratégie d'opération sera proposée et qui devrait permettre de limiter ces phénomènes.

5.5.2. Solutions envisageables

Dans le cadre de cette étude, une installation composée de deux génératrices est considérée. Les solutions et les simulations proposées dépendront, donc, de cette configuration. Cependant, les innovations avancées seront extensibles pour des systèmes avec plus de deux génératrices. D'après les réflexions précédentes, plusieurs problématiques peuvent se dégager de la logique de fonctionnement actuelle du SHEDAC :

- **Puissance installée (des génératrices) excédentaire** par rapport à la charge maximale ;
- **Mauvaise flexibilité** de la puissance issue des génératrices, entraînant :
 - Une surconsommation de carburant ;
 - Une plus grande dissipation de puissance ;
 - Une usure prématurée des génératrices.

Afin de répondre au mieux à ces problématiques, une solution unique sera proposée. Elle se présentera en deux étapes de réflexion. Cette solution se base sur une répartition plus efficace des charges entre les génératrices. Il s'agit, alors, de la stratégie de répartition des charges. La notion de répartition doit se comprendre de deux façons :

- Une répartition adaptée et optimale dans le choix des puissances des génératrices. Par exemple, pour une charge maximale de 100 kW, on choisira une génératrice de 30 kW et une autre de 70 kW plutôt que deux identiques de 50 kW ;
- Une logique de répartition optimale dans l'utilisation même des génératrices lors de l'approvisionnement. Cela consiste à répartir la charge sur les deux génératrices sans nécessairement attendre que la première génératrice atteigne sa capacité maximale.

Ainsi, grâce à ces deux échelles de répartition, il pourra être possible d'améliorer l'efficacité du système. Les analyses suivantes mettront en évidence cette efficacité.

a) Analyse de la répartition adaptée et optimale pour le choix des puissances des génératrices

Sachant que l'analyse considère l'usage de deux génératrices, six configurations possibles peuvent être envisagées quant à la répartition des puissances, soient : 50%-50% (celle actuellement utilisée), 40%-60%, 30%-70%, 20%-80%, 10%-90% et 0%-100% (une seule génératrice en réalité).

En considérant pour l'instant la logique actuelle de fonctionnement et la limite de puissance minimale admissible, des génératrices, fixée à 30% de leur puissance nominale, sera, alors, mise en évidence la répartition la moins déperditrice. C'est-à-dire celle qui permet d'éviter une surconsommation de carburant et une déperdition de puissance accrue. Ainsi, plus les risques d'avoir un fonctionnement forcé d'une génératrice seront faibles, plus la répartition sera intéressante. Pour ce faire, il a été supposé que la charge maximale à

pourvoir est de 100 kW et qu'il n'y a pas de puissance éolienne disponible. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 5.4.

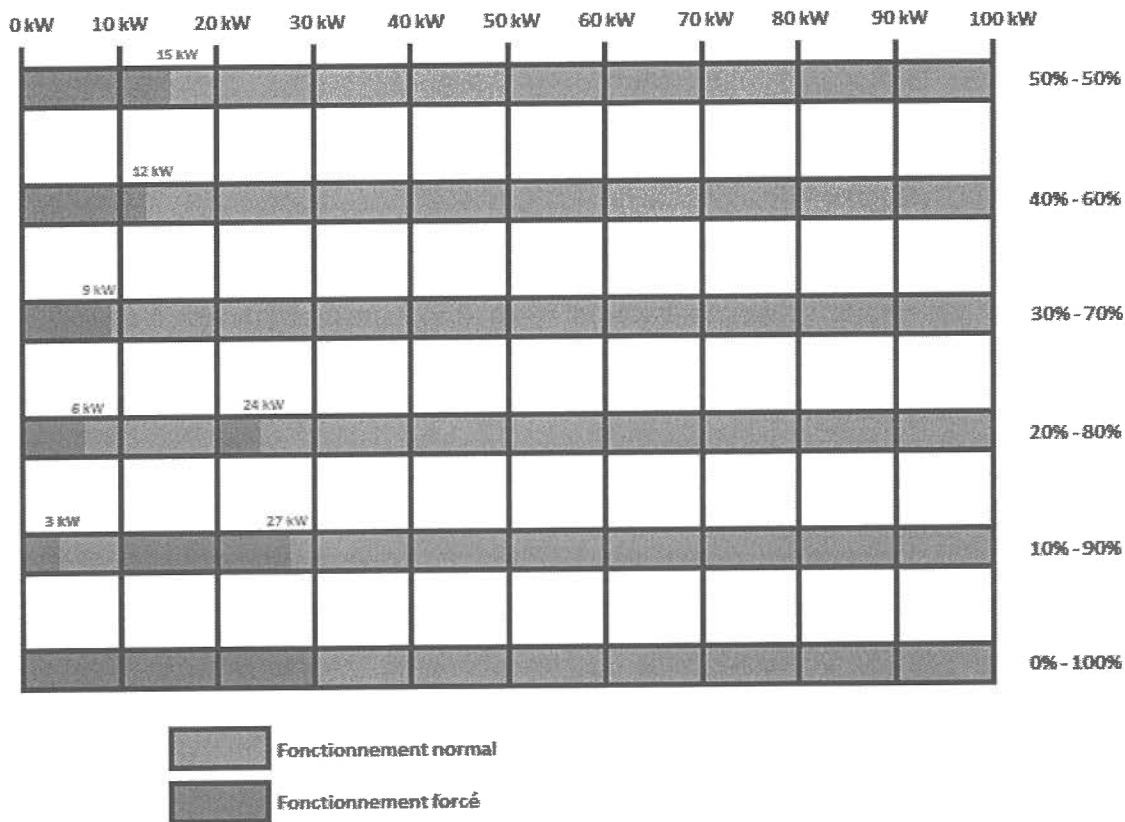


Figure 5.4 : Analyse des répartitions de charge possibles

La figure 5.4 montre que la répartition optimale est la répartition 30%-70% puisque le fonctionnement forcé ne s'étend que sur une plage de 9 kW. La répartition 20%-80% est également intéressante puisque la plage du fonctionnement forcé est de 10 kW. Ensuite, la répartition 40%-60% présente une plage de fonctionnement forcé de 12 kW et la répartition 50%-50% présente une plage de fonctionnement forcé de 15 kW. Il peut, donc, être constaté que la répartition utilisée jusqu'à maintenant (50%-50%) ne se trouve qu'à la quatrième position des possibilités les plus efficaces. Finalement, les répartitions 10%-90% (plage de 20 kW) et 0%-100% (plage de 30 kW) sont les moins efficaces. Cela fait ainsi

ressurgir un point dégagé dans les problématiques, sur le risque de tout miser sur une seule génératrice.

b) Analyse sur la logique de répartition optimale

Dans cette section, l'analyse portera la stratégie qui consiste à proposer une logique de répartition des puissances plus optimale lors du fonctionnement du système.

Le concept proposé vise à jouer sur la répartition et l'équilibrage des puissances des génératrices. Ainsi, les génératrices devront devenir complémentaires l'une de l'autre. En reprenant l'exemple précédent avec les génératrices de 30 kW et 70 kW, le système fonctionnerait comme suit : si la charge est de 30 kW, la stratégie propose de faire fonctionner la petite génératrice pour produire 9 kW et la grosse pour produire 21 kW, plutôt que d'utiliser seulement la petite à pleine puissance. De cette façon, on s'assure d'une flexibilité beaucoup plus intéressante au niveau de la variation de la charge mais aussi des démarrages des génératrices, comme déjà démontré dans un précédent travail [43].

L'algorithme (Figure 5.5) présente, ainsi, la logique de fonctionnement intégrée dans la stratégie. Il est à noter que celle-ci s'applique pour le cas d'une répartition 30%-70% des puissances, sachant qu'il s'agit de la répartition optimale. Dans cet algorithme, est prise en compte la puissance éolienne, mais les phases de stockage-suralimentation du moteur ne sont pas représentées.

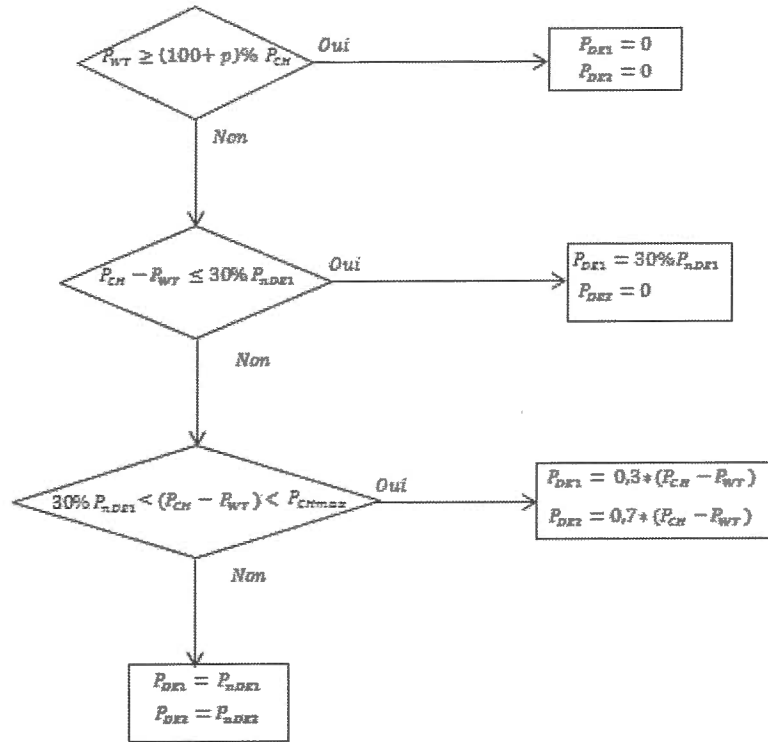


Figure 7.5 : Algorithme de fonctionnement de la stratégie de répartition des charges

5.5.3. Implémentation, simulation et analyse de la stratégie

La stratégie développée est, alors, implantée dans le logiciel de dimensionnement afin d'en étudier son efficacité sur les performances du système. Dans la simulation, une charge dont le maximum est de 120 kW a été retenue. Ainsi, le système comprend une génératrice de 36 kW (30%) et de 84 kW (70%). De plus, comme pour la stratégie précédente, ont été réalisées des simulations pour un faible TPP (40%) et un haut TPP (100%). Ensuite, pour comparer l'efficacité de la stratégie par rapport au système de base, ce dernier sera simulé dans un cas avec deux génératrices de 67,5 kW. Enfin, pour tenir compte du processus de suralimentation, il a été décidé d'appliquer ce processus sur la petite génératrice puisque tout porte à croire que c'est elle qui aura la plus grande fréquence d'opération. Le tableau 5.5. présente les résultats obtenus.

Tableau 5.5 : Résultats des simulations pour la stratégie de répartitions des charges

	Faible TPP: 40%		Haut TPP: 100%	
	Système initial	Système avec stratégie	Système initial	Système avec stratégie
Consommation en Diesel	117 588 L	110 824 L	90 746 L	78 787 L
Puissance dissipée	2 535 kW	427 kW	2 851 kW	1 341 kW

Dans le cas d'un faible TPP, des différences significatives peuvent être remarquées entre la nouvelle stratégie et le système initial. Ainsi, au niveau de la consommation de carburant, une économie de 6764 litres, soit 5,75%, grâce à la stratégie de répartition peut être notée. De plus, le système dissipera près de 2018 kW (83%) de puissance en moins par rapport au système initial, ce qui est très intéressant. Ces résultats illustrent, ainsi, parfaitement le but recherché par la nouvelle stratégie. En répartissant de façon efficace la puissance des génératrices, seront réduits, alors, significativement les temps de fonctionnement forcé et donc la dissipation de puissance.

Dans le cas d'un fort TPP, les phénomènes observés sont sensiblement les mêmes. Pour la consommation de diesel, une économie qui s'élève à 11959 litres (13,2%) peut être observée. Cette économie est d'autant plus grande, par rapport au cas d'un faible TPP, car l'implication accrue de la puissance éolienne a tendance à augmenter les moments de fonctionnement forcé de la génératrice diesel dans le système initial. C'est pourquoi, grâce à la nouvelle stratégie, l'économie de carburant est encore amplifiée. En revanche, il peut être observé que, malgré une baisse de 1510 kW (53%) en puissance dissipée, cette dernière est plus grande dans le cas du fort TPP. Cela s'explique, également, par la plus grosse part de puissance éolienne qui, malgré la présence de l'unité de stockage, peut engendrer des productions de puissance inutilisables.

5.5.4. Conclusions sur les bénéfices de la stratégie

Les résultats précédents ont permis de démontrer que, quel que soit le TPP, la stratégie développée permet d'améliorer significativement les performances du système. Ainsi, grâce à une répartition optimale des répartitions des charges des génératrices, il est possible d'optimiser le SHEDAC d'un point de vue technique et énergétique.

De plus, tout porte à croire qu'une telle configuration ne devrait pas avoir un impact négatif sur les plans financiers et logistiques.

5.6 ÉTUDE DE LA STRATEGIE D'UTILISATION DE L'AIR COMPRIME EN TOUT TEMPS

L'élaboration de cette stratégie se présente comme une première étape pour une stratégie de gestion d'air comprimé prédictive en fonction de la puissance éolienne et du niveau de stockage. Cette stratégie décidera alors si, dans les à instants à venir, il vaut mieux d'utiliser la méthode actuelle de suralimentation où celle qui sera proposée ici. Il est, alors, d'abord nécessaire de déterminer la stratégie et le fonctionnement permettant l'usage de l'air en tout temps.

5.6.1. Intérêt de la stratégie

Actuellement, la méthode de suralimentation est basée sur l'injection de l'air comprimé dans le moteur en tenant compte du rapport air/fuel optimal dans le but d'assurer un rendement optimal du moteur pour une puissance donnée. Recherchant un rendement optimal, cette configuration est sans aucun doute la meilleure.

Néanmoins, cette méthode peut présenter un inconvénient quant à la gestion de la réserve d'air comprimé. En effet, dans ce cas, lorsque l'air contenu dans le réservoir (en supposant que la quantité est, au moins, suffisante pour la suralimentation) est utilisé, on ne

prélève que la quantité dont le système a besoin. Ainsi, si la quantité dans le réservoir est supérieure à celle que nécessaire, l'air « non-utile » reste stocké. Cependant, dans le cas où le réservoir est plein et la puissance éolienne est importante, il se pourrait que l'on se retrouve avec un surplus de puissance puisque l'utilisation de l'air ne permettrait pas de déstocker le réservoir assez rapidement.

Dans une telle configuration, il est possible, alors, de se retrouver dans des périodes caractérisées par de fortes dissipations d'énergie, réduisant ainsi l'efficacité même du système dans son ensemble. Il serait, alors, intéressant d'avoir diverses possibilités pour l'usage de l'air afin de répondre à ce type problème. Il s'agit, alors, de la stratégie de gestion d'air.

5.6.2. *Solution envisageable*

Dans cette étude, est proposée une stratégie alternative pour répondre à la problématique dégagée précédemment. L'objectif est, donc, d'établir une stratégie de fonctionnement permettant d'éviter une congestion au niveau du réservoir de stockage et par conséquent, une dissipation d'énergie accrue. Cependant, l'avantage de cette stratégie, en ce qui concerne la consommation de carburant, sera évalué comparée à celle actuellement en place.

Pour ce faire, la méthode proposée est d'injecter de l'air dans le moteur dès lors qu'il y en a de disponible dans le réservoir. Ainsi, on vise également à minimiser la consommation instantanée de carburant. Les avantages d'un tel fonctionnement sont donc :

- L'assurance de ne pas avoir de congestion dans le réservoir de stockage (sauf cas exceptionnel) ;
- Les puissances mises en jeu grâce aux éoliennes et au système de stockage sont en permanence utilisées. La dissipation d'énergie est, donc, considérablement réduite.

La mise en place d'une telle stratégie nécessite, alors, une nouvelle gestion de l'air à injecter dans le moteur.

a) Mise en équation du fonctionnement

Puisque l'on cherche à injecter l'air dans la génératrice diesel dès que possible, il faut, alors, pouvoir quantifier l'apport énergétique de cette technique au niveau de la génératrice et de sa consommation. Pour ce faire, on considère que, tout comme le diesel, une quantité d'air comprimé possède son propre pouvoir énergétique. Ainsi, pour un volume d'air donné, sera déterminée l'énergie contenue dans celui-ci. Par analogie avec l'énergie contenue dans une quantité de diesel, il serait, alors, possible d'en déduire l'économie de diesel réalisable grâce à l'énergie apportée par l'air.

On détermine l'énergie (kWh) d'un volume d'air comprimé par l'équation suivante [3] :

$$E_{air} = k \frac{nN_c P_{stockage}}{n-1} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_{stockage}} \right)^{\frac{n-1}{nN_c}} \right) V_{air}$$

Où $k=2,778 \times 10^{-6}$ est la constante de conversion de l'énergie en kWh. On est en mesure ensuite de calculer le volume de fuel nécessaire pour produire 1 kWh :

$$V_{fuel} = \frac{E_{fuel}}{PCI_{fuel} \times \rho_{fuel}} \approx 0,1L$$

Finalement, on peut en déduire l'économie de diesel réalisée à partir de l'air disponible :

$$V_{fuel_{economisé}} = E_{air} \times 0,1$$

b) Algorithme de fonctionnement de la stratégie

L'algorithme suivant (Figure 5.6) présente la façon dont le système gère l'utilisation de l'air comprimé afin de respecter le fonctionnement souhaité. Il dépend ainsi des équations d'opération précédentes.

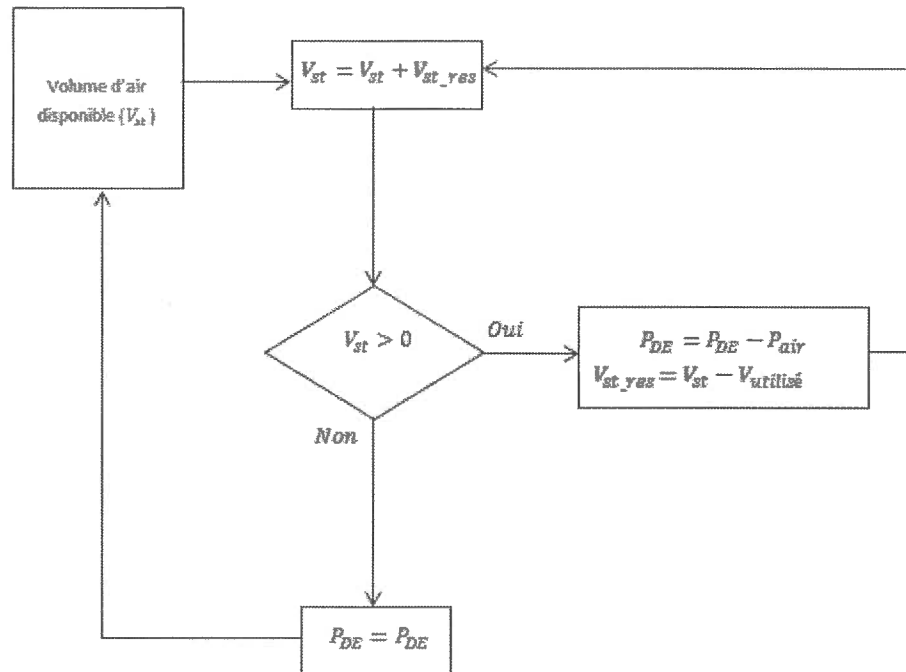


Figure 5.6 : Algorithme de fonctionnement de la stratégie d'utilisation de l'air en tout temps

5.6.3. Implémentation, simulation et analyse de la stratégie

Pour l'implémentation de cette stratégie, le logiciel doit, alors, être reconfiguré afin de tenir compte des nouvelles contraintes d'opération. Afin de comparer les résultats obtenus avec ceux issus d'une ancienne étude qui avait envisagé une telle stratégie [11], des simulations ont été effectuées sur un cas d'étude représentant un village isolé dans le Nord canadien dont la charge moyenne est de 500 kW. De plus, des simulations ont été réalisées

pour un faible TPP (40%) et un fort TPP (100%). Les résultats sont présentés dans le tableau 5.6. ci-après :

Tableau 5.6 : Résultats des simulations pour la nouvelle stratégie de gestion d'air

	Faible TPP: 40%		Haut TPP: 100%	
	Stratégie actuelle	Stratégie proposée	Stratégie actuelle	Stratégie proposée
Consommation en Diesel	719 304 L	719 533 L	620 987 L	622 009 L

Il peut être remarqué que, quel que soit le TPP, la consommation de carburant est plus importante dans le cas de la nouvelle stratégie. Néanmoins, si l'on regarde plus en détail les consommations horaires, on peut s'apercevoir que pour certaines heures, la consommation avec la stratégie proposée est inférieure à celle de la stratégie actuelle. On peut en déduire que, sur l'ensemble de l'étude, les économies réalisées à certains moments par la nouvelle stratégie ne permettent pas de compenser les économies que le système aurait pu faire à d'autres moments avec la stratégie actuelle.

Les résultats obtenus sont, néanmoins, en adéquation avec les hypothèses initiales de la stratégie, basée sur l'ancienne étude. En effet, cette stratégie ne se présente pas comme une stratégie optimale sur l'ensemble d'une durée d'étude mais elle peut s'avérer utile et efficace à certains moments.

5.6.4. Conclusions sur les bénéfices de la stratégie

Manifestement, la stratégie qui vient d'être réalisée permet de répondre aux exigences souhaitées afin de mettre en place une stratégie « hybride » prédictive optimale. Grâce à une prédiction des données énergétiques et de l'état du stockage, cette stratégie alternera, alors, entre la stratégie actuelle et celle développée dans le cadre de cette étude.

5.7 CONCLUSION

Dans cette étude, il a été démontré à quel point les performances du SHEDAC pouvaient être sensibles aux variations de divers paramètres. De par ces différents sous-systèmes, de nombreux points d'optimisation peuvent, alors, être mis en évidence. Ainsi, en se penchant sur certains paramètres et contraintes, il a été possible de proposer de nouvelles stratégies d'opération permettant d'optimiser le fonctionnement du système.

Les trois stratégies développées ont, alors, démontré, de façon indépendante, comment le fonctionnement du système pouvait être modifié ou altéré dans le but d'améliorer ses performances. Alors que les deux premières stratégies ont clairement assuré un bénéfice pour le fonctionnement du SHEDAC, la troisième s'est plutôt présentée comme une étape préliminaire au développement d'une stratégie beaucoup plus complexe.

CHAPITRE 6

SYNTHESE, CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS AU COURS DE MON ETUDE

6.1.1. Description du logiciel développé pour le dimensionnement d'un SHEDAC

Lors de la première phase du présent projet de recherche, a été développé et mis en place un logiciel innovateur permettant le dimensionnement technique et énergétique d'un système éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC). De par sa conception, cet outil se veut universel puisqu'il peut être utilisé pour divers cas d'étude visant l'implantation d'un SHEDAC.

Ainsi, grâce aux modèles énergétiques qui y ont été implantés, le logiciel permet les choix des types d'éoliennes, de génératrices diesel, de compresseurs et de réservoirs de stockage que l'on souhaite étudier et implanter. Les résultats obtenus proposent des informations sur la consommation en carburant et les fréquences d'opération des génératrices, la distribution de la puissance entre les différents sous-systèmes ainsi que l'état du stockage. De plus, il est possible d'établir une comparaison sur la consommation de carburant par rapport à un système hybride éolien-diesel ou un système uniquement composé de génératrices.

La véracité des résultats générés par le logiciel a également été vérifiée grâce à une comparaison avec le logiciel HOMER®, une référence dans le domaine des logiciels de dimensionnement de systèmes hybrides. Avec des écarts entre les résultats inférieurs à 10

%, la fiabilité de l'outil développé a pu, facilement, être attestée, de même que de la pertinence des conclusions que l'on peut en tirer.

6.1.2. Analyse des performances et optimisation du SHEDAC

Dans la continuité du développement du logiciel de dimensionnement et pour en démontrer sa capacité à déterminer un système optimal pour un cas précis, une analyse paramétrique et une analyse des performances du SHEDAC ont été proposées.

Ces analyses ont, alors, démontré que l'efficacité énergétique du SHEDAC peut varier significativement selon les paramètres des sous-systèmes et que, grâce au logiciel, il est désormais possible de choisir et faire varier ces configurations. Une telle procédure permet, alors, d'agir efficacement sur le dimensionnement du système et d'en effectuer l'optimisation énergétique dans un délai raisonnable.

À travers une étude préliminaire sur le site isolé du camp Esker, une optimisation d'un SHEDAC à faible et fort taux de pénétration en puissance éolienne (TPP), a été effectuée. Au regard des résultats obtenus sur la consommation en carburant, par rapport au système composé seulement de génératrices diesel, le SHEDAC permet des économies significatives, quel que soit le TPP. Ainsi, il a été possible d'afficher une économie de 15,5 % pour un faible TPP et une économie de 30% pour un fort TPP.

De tels résultats permettent d'établir d'une part, la pertinence de l'utilisation d'un SHEDAC pour des sites isolés nordiques et d'autre part, de mettre l'accent sur l'influence du TPP sur l'efficacité du système. Le TPP se présente, donc, comme un paramètre majeur dans le dimensionnement d'un système hybride en énergie.

6.1.3. Étude énergétique du site isolé d'Esker pour l'implantation d'un SHEDAC

À travers la deuxième phase du projet, une étude concrète pour le dimensionnement énergétique d'un SHEDAC a été réalisée. Le site qui a fait l'objet de cette étude est le camp Esker, situé dans le Nord du Québec, qui est en fait le point central du projet global dont le présent mémoire est une contribution. Pour ce faire, le logiciel développé précédemment a été mis à profit.

Outre, la volonté d'implanter un système hybride sur ce site afin de répondre à ses problématiques énergétiques, cette étude a permis de mettre en évidence tous les défis qui sont associés à la « simple » mise en place d'un nouveau système de production électrique. En effet, une telle procédure nécessite bien souvent différentes étapes dont la question de l'efficacité énergétique du site est au premier plan :

- a) Analyse de la consommation énergétique actuelle du site et évaluation des sources entraînant des surconsommations ;
- b) Réduction de la consommation énergétique en appliquant des mesures d'efficacité énergétique là où c'est nécessaire ;
- c) Étude du système énergétique qui serait le plus adapté à répondre aux problématiques du site. Cette étape peut, également, comprendre des études sous-jacentes comme l'évaluation des ressources météorologiques.

Ainsi, en ce qui concerne le projet d'étude sur le camp Esker, il a été démontré que d'une part, la génératrice diesel actuelle (150 kW) n'est pas adaptée aux besoins énergétiques du site et que d'autre part, la consommation même du site était très incohérente par rapport à l'exploitation du site. Un examen détaillé de tous les postes consommateurs a, alors, permis d'entrevoir la possibilité de réduire de façon non négligeable les consommations en chauffage et en éclairage. C'est ainsi que, grâce à une réévaluation des besoins et en tenant compte des contraintes saisonnières, une réduction de 30 % de la consommation énergétique totale annuelle a pu être réalisée.

C'est à la suite de cette étape que le dimensionnement d'une nouvelle source de production électrique a été entrepris. De la sorte, les réponses aux problématiques énergétiques du camp Esker ont pu être accomplies grâce à une réflexion d'efficacité énergétique globale.

6.1.4. Étude de dimensionnement d'un SHEDAC pour son implantation sur le site d'Esker

Dès lors que la nouvelle consommation du camp Esker a été établie, une étude précise pour le dimensionnement d'un SHEDAC sur le site a pu débuter. Ce travail avait pour objectif principal de mettre en place un système optimal, d'un point de vue technique et énergétique, afin de répondre aux problématiques et contraintes du camp.

Dans le but d'envisager un large panel de configurations possibles et d'en dégager celle qui conviendrait le mieux au site, une étude comparative entre différentes solutions a été menée. Celle-ci s'est basée sur le choix de trois modèles d'éoliennes possibles, de trois modèles de génératrices diesel (dont celle actuellement en place) et de trois niveaux de pression de stockage, permettant la comparaison de 27 systèmes. Il est à noter que le choix des différents sous-systèmes a été fait en tenant compte des besoins du site et des travaux ultérieurs sur des cas similaires.

L'étude comparative a été élaborée en se basant sur sept critères techniques et énergétiques qu'il est indispensable de prendre en compte lors du dimensionnement d'un système hybride en site isolé. Une pondération a été, également, affectée à chaque critère dépendamment des besoins principaux du camp.

À l'issue de cette étude, la configuration optimale qui en est ressortie est un système composé de deux génératrices Caterpillar de 27 kW, de quatre éoliennes Bergey de 10 kW, et d'un système de stockage dont la pression est de 30 bars. Le SHEDAC ainsi dimensionné, permet de proposer une économie de carburant de près de 70 % par rapport

au système actuellement en place. Les résultats obtenus avec le logiciel permettent, également, de démontrer significativement l'avantage d'un SHEDAC par rapport à un simple système éolien-diesel dont les économies ne seraient que de 3 %. De plus, l'observation des fréquences de fonctionnement des génératrices montre que pour environ 80 % du temps, le système fonctionne au maximum avec une seule génératrice. Ce résultat s'avère très intéressant d'un point de vue de la sécurité d'approvisionnement du site, de la maintenance des sous-systèmes et donc de leur durée de vie.

D'un point de vue technique et énergétique, toute la pertinence d'implanter un SHEDAC sur le site d'Esker a, ainsi, été démontrée ainsi que la capacité du logiciel développé à établir des études de dimensionnement comparatives dans le but d'élaborer un système optimal.

6.1.5. Élaboration de nouvelles stratégies d'opération pour le SHEDAC

Cette dernière étape du projet a permis, grâce à tous les résultats obtenus dans les étapes précédentes, de démontrer comment il a été possible d'implanter des solutions d'optimisation pour le fonctionnement du SHEDAC. Cela s'est ainsi traduit par la mise en œuvre de nouvelles stratégies d'opération.

Dans le but de proposer des points d'optimisation, a été présentée une analyse paramétrique permettant de démontrer la sensibilité des performances du système face aux variations de certains paramètres. Il s'agissait de mettre à profit les conclusions avancées dans les précédentes analyses du mémoire. Ainsi, des paramètres variables et des contraintes opérationnelles ont pu être retenus et c'est autour d'eux que trois nouvelles stratégies d'opération pour le SHEDAC ont été proposées.

La première s'intitule stratégie de sécurité. Son fonctionnement repose sur le choix de laisser en marche une génératrice même quand cela n'est pas nécessaire. Le but de cette stratégie est, ainsi, d'assurer l'approvisionnement de la charge, même en cas de variation brusque de la puissance éolienne, et d'améliorer la régulation de la fréquence et de la

tension à la sortie du système. Les simulations réalisées ont, alors, permis de montrer que, malgré une légère hausse de la consommation de carburant par rapport au système sans cette stratégie, cette différence n'est pas significative par rapport aux bénéfices apportés.

La deuxième stratégie traite d'une amélioration de la répartition des charges des génératrices. Il s'agit, ici, de redéfinir la méthode à partir de laquelle les génératrices diesel sont choisies et utilisées dans le système. Ainsi, il a été démontré comment rendre les génératrices dépendantes l'une de l'autre dans le but de réduire notamment les situations de déperdition de puissance. Les résultats obtenus ont, alors, prouvé que les performances du système étaient effectivement améliorées grâce à une répartition optimale des puissances.

Enfin, la troisième stratégie s'est présentée en réalité comme une première étape à l'élaboration d'une stratégie de plus grande envergure pour une gestion optimale de l'air comprimé. Ainsi, l'objectif n'était pas de démontrer, ici, une amélioration des performances globales du système mais plutôt de prouver comment la stratégie pouvait être efficace dans certains cas. Les résultats obtenus ont prouvé que l'utilisation instantanée de la réserve d'air pouvait être pertinente dans certains moments.

6.2 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

6.2.1. Conclusions

Ce mémoire fait suite à une série de travaux dans lesquels il a été démontré, pour diverses situations, l'efficacité d'un système hybride éolien-diesel avec stockage par air comprimé (SHEDAC) destiné à alimenter en électricité des sites isolés. À travers ce projet, a été, ainsi, modélisé, mis en œuvre et validé, un logiciel de dimensionnement énergétique pour un SHEDAC. Le développement de cet outil s'est présenté comme une innovation dans le domaine puisque, à ce jour, il n'existait pas de logiciel capable de modéliser un tel système. En proposant un vaste choix de paramètres à dimensionner pour les différents sous-systèmes, le logiciel permet de rechercher des solutions optimales pour l'implantation

d'un SHEDAC en zone isolée. Grâce aux résultats obtenus sur la consommation en carburant et sur la fréquence d'opération des génératrices, cet outil permet de présenter les avantages énergétiques du SHEDAC et la capacité de ce système à répondre aux problématiques d'électrification. De plus, la possibilité de modifier les paramètres du système permet d'identifier les zones d'améliorations éventuelles du système en fonction du cas étudié.

Ce mémoire étant présenté dans un projet de recherche global visant l'implantation d'un SHEDAC sur le site isolé du camp Esker, il a été possible de mettre en application l'utilisation du logiciel développé afin de proposer un système optimal répondant aux problématiques énergétiques du camp. Au-delà de ce travail, une étude plus générale a été menée afin de proposer une meilleure gestion énergétique du site. Ainsi, il a été démontré qu'une réduction de 30 % de la consommation électrique actuelle était envisageable. C'est dans cette optique que le dimensionnement du SHEDAC a été envisagé. Grâce à l'utilisation du logiciel, et d'une étude comparative multicritères, une solution optimale a été proposée. En tenant compte des contraintes techniques du site, la solution permet de réduire la consommation de diesel de 70 % par rapport à la situation actuelle, tout en améliorant la qualité et la sécurité d'approvisionnement de la charge. De tels résultats ont, ainsi, permis d'entrevoir avec assurance la pertinence de l'utilisation du SHEDAC sur ce site et de démontrer l'efficacité du logiciel pour ce type d'étude.

Enfin, l'étude réalisée sur l'élaboration de nouvelles stratégies d'opération a permis de conclure, de façon efficace, sur les objectifs visés par ce projet. En effet, la mise en place de nouvelles stratégies d'opération s'encre toute à fait dans une volonté d'un dimensionnement spécifique du SHEDAC et d'une recherche d'optimisation. Ainsi, les outils, tels que le logiciel, et les résultats obtenus tout au long de la recherche effectuée dans le cadre de ce projet, ont permis de développer le matériel nécessaire à l'élaboration de stratégies d'opération et d'optimisation du SHEDAC. En fonction des contraintes, il a donc été démontré de quelle façon le système pouvait être dimensionné dans le but d'optimiser au mieux ses performances.

6.2.2. Perspectives

Ce mémoire doit constituer une base pour deux axes de travail. En effet, a été traité le développement d'un logiciel de dimensionnement énergétique pour SHEDAC, du projet d'implantation d'un SHEDAC sur le site d'Eske, ainsi que de l'élaboration de nouvelles stratégies d'opération. De ce fait, ces trois travaux permettent d'entrevoir différentes perspectives qui leur sont propres.

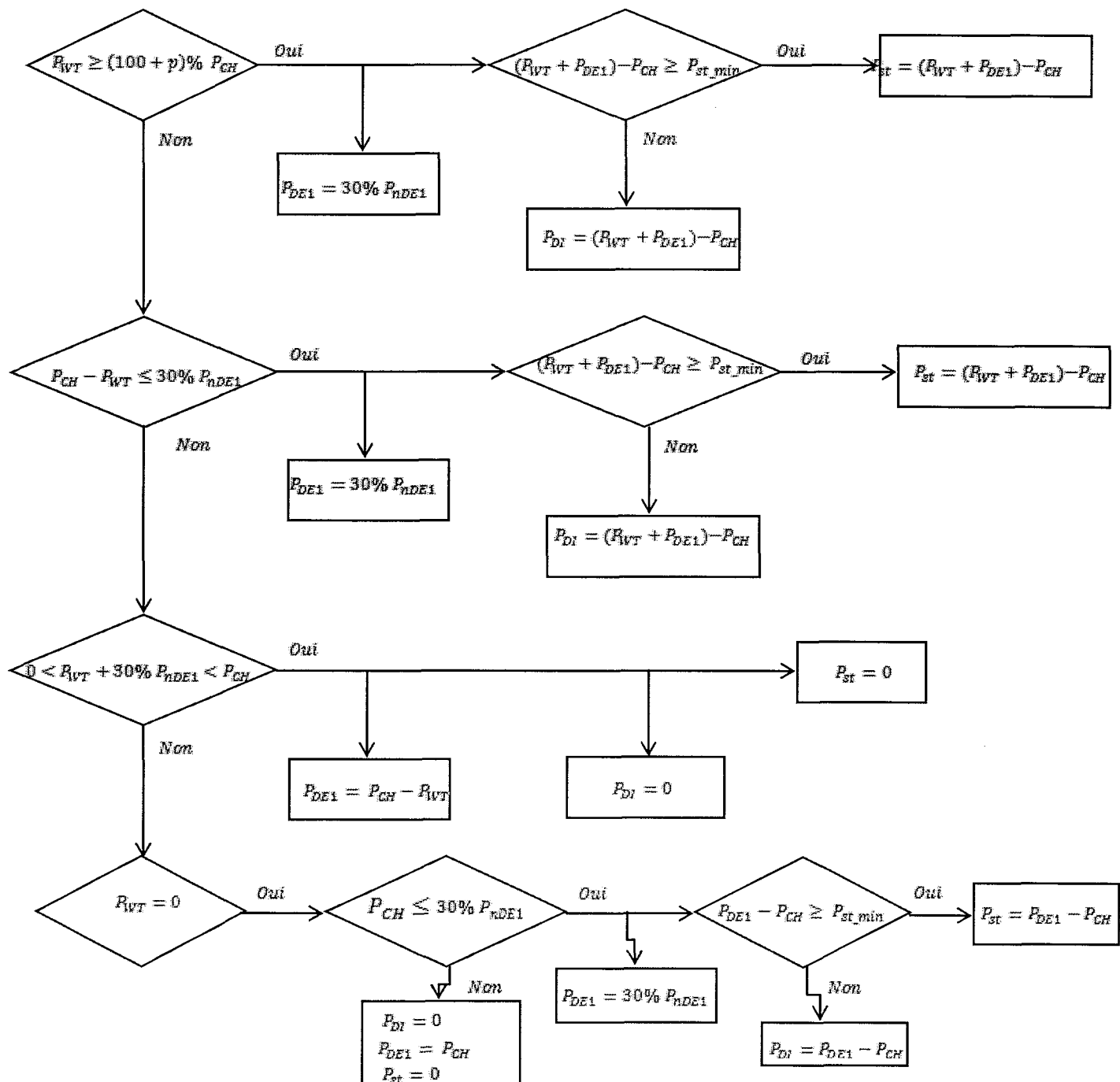
En ce qui concerne le logiciel, il sera nécessaire d'implémenter des modules économiques et environnementaux afin de proposer un outil complet et semblable à ceux disponibles sur le marché. Des étapes subséquentes pour la mise en œuvre des stratégies d'opération devront également être réalisées. Les actions préconisées à l'égard de l'amélioration et l'utilisation du logiciel et des stratégies d'opération sont les suivantes :

- a) Développer des modules économiques et environnementaux complémentaires au dimensionnement énergétique actuel mis en place ;
- b) Réaliser une validation expérimentale des résultats obtenus avec le logiciel. Le banc d'essai du TechnoCentre éolien pourrait permettre de supporter une telle validation ;
- c) Réaliser une validation expérimentale des stratégies qui ont été développées ;
- d) Élaborer et implémenter totalement la stratégie globale pour la gestion optimale de l'air comprimé.

Au sujet de l'implantation du SHEDAC sur le site d'Eske, diverses actions théoriques et pratiques devront être réalisées. D'une part, des études sur la viabilité financière et logistique de l'implantation du SHEDAC seront à effectuer, en complément de l'étude énergétique présentée dans ce mémoire. D'autre part, des actions concrètes sur la réduction de la consommation énergétique actuelle du camp devront être apportées :

- e) Réaliser des études financières et logistiques pour l'implantation d'un SHEDAC sur le camp Esker. Ces études devront permettre de confirmer ou de modifier le système dont on a déterminé l'optimum d'un point de vue énergétique ;
- f) Réduire la consommation énergétique actuelle du camp afin d'atteindre les objectifs visés et préconisés dans le mémoire ;
- g) Définir et réaliser des systèmes de gestion appropriés pour le bon fonctionnement du SHEDAC sur le site.

ANNEXE I
ALGORITHME DE FONCTIONNEMENT DE LA STRATEGIE DE SECURITE



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ELHAJJ, Marwa. 2009. « Etude de cas de l'électrification d'un village nordique par un système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé à moyenne échelle ». Rapport de stage, Rimouski : Université du Québec à Rimouski, 158 p.
2. AH-YOU, Kim et Greg LENG. *Energies renouvelables pour les communautés éloignées*. Ressources Naturelles Canada.
3. IBRAHIM, Hussein. 2010. « Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé ». Thèse de doctorat en ingénierie, Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi, 420 p.
4. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2008. *Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés*. Rapport Interne. Rimouski (Qc): Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne, 181 p.
5. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. 2014. *Politique énergétique 2016-2025*. Gouvernement du Québec, 45 p.
6. BOURBONNAIS, Martin. 2013. « L'approvisionnement énergétique durable des sites isolés ». Mémoire de la chaire de recherche industrielle TERRE, Jonquière: Cégep de Jonquière, 20 p.
7. Ressources naturelles Canada. « Diminuer le coût de l'électricité en réseaux isolés » dans *RNCAN* en ligne. <<http://www.rncan.gc.ca/energie/electricite-infrastructures/smart-grid/enjeux/4576>>. Consulté le 14 juillet 2015.
8. SAULNIER, Bernard. 2011. « Analyse des variantes de jumelage éolien-diesel pour la conception, la planification et l'exploitation des réseaux autonomes du Québec ». RNCREQ, 52 p.
9. WENQIANG, Liu, G. SHUHUA et Q. DAXIONG. 2007. « Techno-Economic assessment fo off-grid hybrid generation systems and the application prospects in China ». *World Energy Council*.
10. MRNF. 2006. *La stratégie énergétique du Québec 2006-2015, L'énergie pour construire le Québec de demain*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 138 p.

11. FORCIONE, Alain. 2004. *Système jumelé éolien-diesel aux îles-de-la-Madeleine (Cap-aux-Meules) - Etablissement de la VAN optimale*. Rapport Hydro Québec, 163 p.
12. MERCI, Gilles. 2002. *Les énergies renouvelables au Canada*. Rapport de situation, Ressources Naturelles Canada, 64 p.
13. DESLAURIERS, Jean-Claude. 2007. *Plan d'approvisionnement 2008-2017 d'Hydro-Québec Distribution 2007*. Régie de l'énergie, 56 p.
14. BHANDARI, Binayak, Kyung-Tae LEE, Caroline S. LEE, Chul-KI SONG, Ramesh K. MASKEY, Sung-Hoon AHN. 2014. « A novel off-grid hybrid power system comprised of solar photovoltaic, wind, and hydro energy sources » *Applied Energy*, volume 133, pp. 236-242.
15. CHUA, K.J, W.M Yang, S.S ER, C.A HO. 2014 « Sustainable energy systems for a remote island community » *Applied Energy*, volume 113, pp. 1752-1763.
16. BASBOUS, Tammam. 2012. « Hybridation pneumatique d'un moteur diesel en vue de son utilisation dans un système hybride éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé ». Thèse de doctorat en ingénierie, Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi, 226 p.
17. WEIS, Timothy M. et Adrian ILINCA. 2010. « Assessing the potential for wind power incentive for remote villages in Canada ». *Energy Policy*, volume 38, numéro 10, pp. 5504-5511.
18. WEIS, Timothy M. , Adrian ILINCA et Jean-Paul PINARD. 2008. « Stakeholder's perspective on barriers to remote wind-diesel power plants in Canada ». *Energy Policy*, volume 36, numéro 5, pp. 1611-1621.
19. IBRAHIM, Hussein, M. GHANDOUR, Mariya DIMITROVA, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2011. « Integration of wind energy into electricity systems: Technical challenges and actual solutions ». *Energy Procedia*, volume 6, pp. 815-824.
20. TOMILSON, Andrew G. 1998. « Frequency and voltage control of a high-penetration, no-storage wind-diesel system ». Thèse de maîtrise en ingénierie, St.John's : University of Newfoundland, 229 p.
21. DROUILHET, Stephen et Mari SHIRAZI. 2002. *Wales, Alaska - High-penetration wind-diesel hybrid power system*. Rapport Technique. Golden (Co): National Renewable Energy Laboratory, 72 p.

22. BELANGER, Camille et Luc GAGNON. 2002. « Adding wind energy to hydropower ». *Energy Policy*, volume 30, numéro 14, pp. 1279-1284.
23. DURSUN, Bahtiyar et Cihan GOKCOL. 2011. « The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey ». *Renewable Energy*, volume 36, numéro 4, pp. 1227-1235.
24. ELHADIDY, M.A. 2002. « Performance evaluation of hybrid (wind/solar/diesel) power systems ». *Renewable Energy*, volume 26, numéro 3, pp. 401-413.
25. EL KHADIMI, A. , L. BCHIR. et A. ZEROUAL. 2004. « Dimensionnement et optimisation techno-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien avec système de stockage ». *Energies renouvelables*, volume 7, pp. 73-83.
26. BELFKIRA, Rachid, Lu ZHANG et Georges BARAKAT. 2010. « Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit ». *Solar Energy*, volume 85, numéro 1, pp. 100-110.
27. OULD, Bilal B. , V. SAMBOU, C.M.F KEBE, P.A. NDIAYE et M. NDONGO. 2012. « Methodology to size an optimal stand-alone PV/wind/wind/diesel/battery system minimizing the levelized cost of energy and the CO2 emissions ». *Energy Procedia*, volume 14, pp. 1636-1647.
28. KAABECHE, Abdelhamid et Rachid IBTIOUEN. 2014. « Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system ». *Solar Energy*, volume 103, pp. 171-182.
29. MOUSTAFA, Nagham. 2013. *Stratégies de fonctionnement du système hybride éolien-diesel solaire avec stockage dans des batteries*. Rapport de stage. Université Libanaise, 57 p.
30. IEC. 2011. *Electrical Energy Storage*. White paper. International Electrotechnical Commission, 92 p.
31. WEIS, Timothy M. et Adrian ILINCA. 2008. « The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada ». *Renewable Energy*, volume 33, numéro 7, pp. 1544-1557.
32. SUBERU, Mohammed Yekini Suberu, Mohd Wazir MUSTAFA et Nouruddeen BASHIR. 2014. « Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 35, pp. 499-514.

33. KUO, Ming-Tse et Hao T. WEI. 2014. « Optimum sizing of PV/wind/battery hybrid microgrids consider the minimum electricity cost ». *Energies*.
34. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA et Jean Perron. 2008. « Energy storage systems - Characteristics and comparisons ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 12, numéro 5, pp. 1221-1250.
35. IBRAHIM, Hussein, R. BEGUENANE et A. MERABET. 2012. « Technical and financial benefits of electrical energy storage ». *Electrical Power and Energy Conference*, pp. 86-91.
36. ZHAO, Haoran, Quiwei WU, Shuju HU, Honghua XU et Claus RASMUSSEN. 2015. « Review of energy storage system for wind power integration support ». *Applied Energy*, volume 137, pp. 545-553.
37. MANCHESTER, Sebastian, Lukas SWAN et Dominic GROULX. 2015. « Regenerative air energy storage for remote wind-diesel micro-grid communities ». *Applied Energy*, volume 137; pp. 490-500.
38. SUN, Hao, Xing LUO et Jihong Wang. 2015. « Feasibility study of hybrid wind turbine system - Integration with compressed air energy storage ». *Applied Energy*, volume 137, pp. 617-628.
39. SAADAT, Mohsen, Farzad A SHIRAZI et Perry Y. LI. 2015. « Modeling and control of an open accumulator compressed air energy storage (CAES) system for wind turbines ». *Applied Energy*, volume 137, pp. 603-616.
40. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2007. « Comparison and analysis of different energy storage techniques based on their performance ». *Electrical Power Conference*. pp. 393-398.
41. IBRAHIM, Hussein et Adrian ILINCA. 2013. « Techno-economic analysis of different energy storage technologies ». Dans *Energy storage - Technologies and applications*, sous la direction de Ahmed Faheem Zobaa. 40 p.
42. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA, Rafic YOUNES, Jean PERRON et Tammam BASBOUS. 2007. « Study of a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage ». *Electrical Power Conference*, pp. 320-325.
43. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA. et Jean PERRON. 2012. « Integration of wind turbines with compressed air energy storage in remote area power supply system ». *Proceeding of European Wind Energy Association (EWEA)*, Copenhagen, Denmark.

44. DANVEST. « Danvest How does it work ? » Dans *Danvest* En ligne. <<http://www.danvest.com/how-does-it-work.pp>>. Consulté le 24 février 2015.
45. IBRAHIM, Hussein, Mariya DIMITROVA, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2008. « Système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé pour l'électrification d'une station de télécommunication isolée ». *European Journal of Electrical Engineering*, volume 12, pp. 701-731.
46. IBRAHIM, Hussein, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2006. *Moteur diesel suralimenté bases et calculs cycles réel, théorique et thermodynamique*. Rapport Interne. Rimouski: Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne, 103 p.
47. BASBOUS, Tammam, Rafic YOUNES, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2012. « Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for wind-diesel energy generation ». *Energy*, volume 38, numéro 1, pp. 264-275.
48. BASBOUS, Tammam, Rafic YOUNES, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2012. « A new hybrid pneumatic combustion engine to improve fuel consumption of wind-diesel power system for non-interconnected areas ». *Applied Energy*, volume 96, pp. 459-476.
49. BASBOUS, Tammam, Rafic YOUNES, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2012. « Fuel consumption evaluation of an optimized new hybrid pneumatic-combustion vehicle engine on several driving cycles ». *International Journal of Engine Research*, volume 13, pp. 514-528.
50. BASBOUS Tammam, Rafic YOUNES, Adrian ILINCA et Jean PERRON. 2012. « Optimal management of compressed air energy storage in a hybrid wind-pneumatic-diesel system for remote area's power generation ». *Applied Energy*.
51. BASBOUS, Tammam. 2009. « Etude de faisabilité d'un jumelage éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé ». Mémoire de maîtrise en ingénierie, Rimouski: Université du Québec à Rimouski, 131 p.
52. DECK-LEGER, Zoé-lise. 2011. « Contrôle d'un système de couplage éolien-diesel avec stockage d'air comprimé ». Rapport de stage, Gaspé: TechnoCentre Eolien, 30 p.
53. IBRAHIM, Hussein. 2005. *Analyse dynamique d'un système couplé, éolienne-diesel-stockage Modélisation et Contrôle*. Rimouski (Qc): Université du Québec à Rimouski, 176 p.

54. TECHNOCENTRE EOLIEN. « Micro réseau (couplage éolien-diesel) » Dans
TechnoCentre Eolien En ligne
<<https://www.eolien.qc.ca/fr/infrastructures/microreseau-couplage-eolien-diesel.html>>. Consulté le 24 février 2015.
55. MARTINEZ Nicolas, Adrian ILINCA., Hussein IBRAHIM et Youssef BENCHAAABANE. 2015. « Simulation Tool for a Hybrid Wind-Diesel System with CAES ». *Applied Energy*, soumis en Mars 2015.